

Vergleichende Untersuchungen zur Föhnhäufigkeit im Rheintal zwischen Chur und Bodensee

Anwendung der Diskriminanzanalyse von FISHER
unter besonderer Berücksichtigung des Raumes
Landquart — Bad Ragaz — Buchs SG

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Philosophischen Doktorwürde

vorgelegt der Philosophischen Fakultät II
der Universität Zürich
von Thomas Gutermann aus Arbon TG und Zürich

1970

Begutachtet von den Herren Prof. Dr. Max Schüepp und Prof. Dr. Hans Boesch

Erscheint gleichzeitig als Heft Nr. 18 in der Reihe der Veröffentlichungen
der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt

City-Druck AG, Zürich
1970

VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN ZUR FOEHNHAEUFIGKEIT IM RHEINTAL
ZWISCHEN CHUR UND BODENSEE

Anwendung der Diskriminanzanalyse von FISHER unter besonderer Berücksichtigung
des Raumes Landquart - Bad Ragaz - Buchs SG

INAUGURAL - DISSERTATION

zur

ERLANGUNG DER PHILOSOPHISCHEN DOKTORWUERDE

vorgelegt der

PHILOSOPHISCHEN FAKULTAET II

der

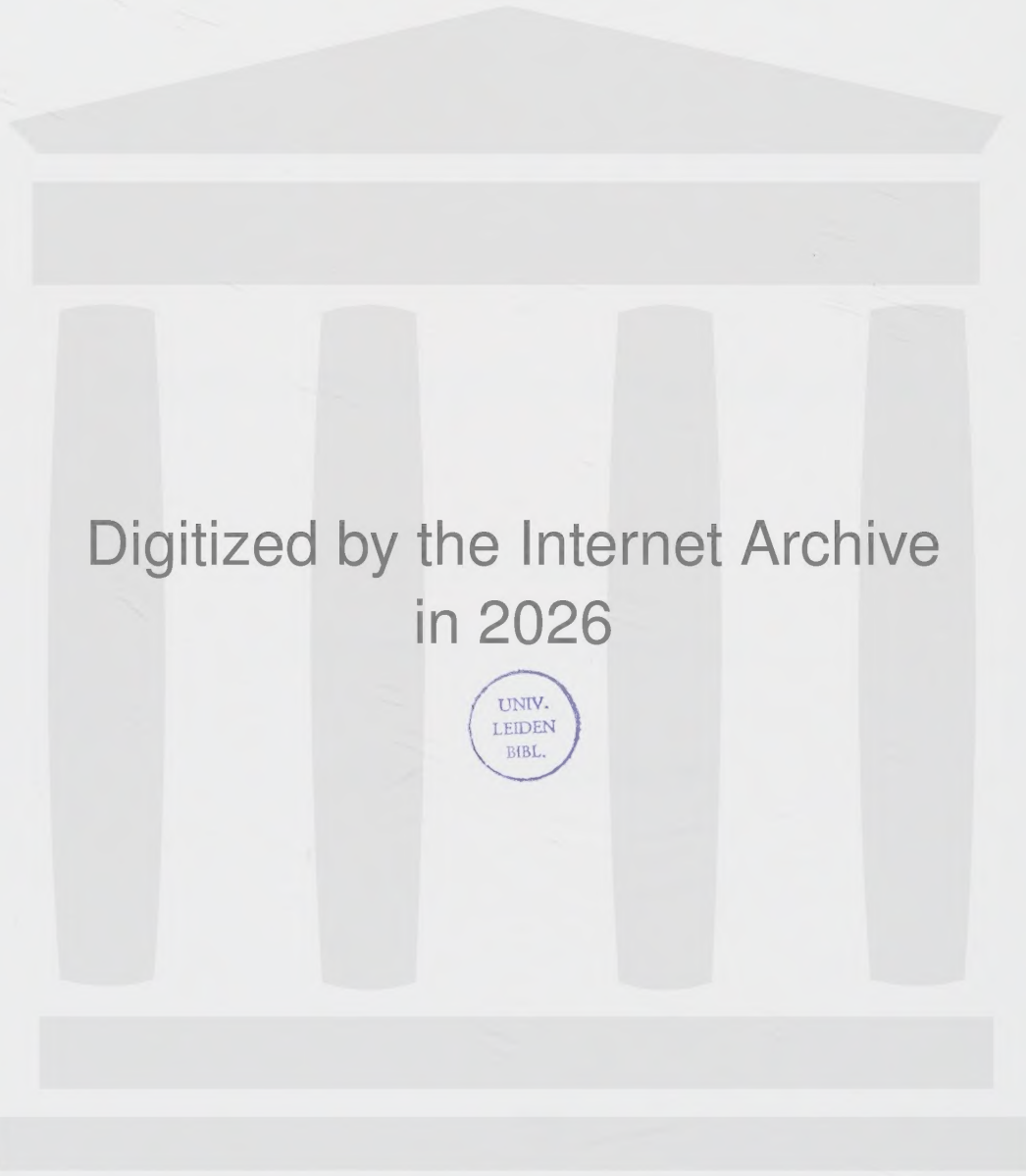
UNIVERSITAET ZUERICH

von

Thomas Gutermann

aus Arbon TG und Zürich

Begutachtet von den Herren Prof. Dr. Max Schüepp und Prof. Dr. Hans Boesch



Digitized by the Internet Archive
in 2026



VORWORT

Trotz der bereits vorliegenden sehr umfangreichen Föhnliteratur werden immer wieder neue Untersuchungen in Angriff genommen. Bis heute hat jedoch keine der zahlreichen physikalischen Theorien über die Ursache des leeseitigen Absteigens der Föhnströmung in die Täler allgemeine Anerkennung gefunden. Neben diesem zentralen physikalischen Problem sind auch noch zahlreiche klimatologische Fragen unbearbeitet. So fehlte bis heute eine Untersuchung der Südföhnverhältnisse im Rheintal.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Schliessung dieser Lücke liefern. Nach einer Zusammenfassung der verwendeten statistischen Verfahren wird im zentralen zweiten Teil im Hinblick auf zukünftige Bearbeitungsmethoden in der Klimatologie besonders die Anwendbarkeit des von FISHER entwickelten Trennverfahrens für eine objektive Abgrenzung der Föhnbeobachtungstermine geprüft. Im dritten Teil gelangen erste Ergebnisse einer lokalklimatologischen Föhnuntersuchung im Rheintal (Raum Landquart - Bad Ragaz - Buchs SG) zur Darstellung.

Den folgenden Personen bin ich besonders zu Dank verpflichtet:

Herrn Prof. Dr. H. Boesch, Direktor des Geographischen Institutes der Universität Zürich, für die Studienberatung und sein Interesse an der vorliegenden Arbeit,

Herrn Prof. Dr. M. Schüepp für die Ratschläge bei der Wahl und Abgrenzung des Themas und für die zahlreichen Hinweise und Diskussionen bei auftretenden Problemen,

den Herren Prof. Dr. D. Steiner, University of Waterloo, Kanada und
PD Dr. Th. Ginsburg für die Anregungen aus den Arbeitsgebieten der Statistik und der elektronischen Datenverarbeitung,

Herrn R. Schneider, Direktor der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt (MZA), für die Ueberlassung des Arbeitsplatzes,

den Herren Prof. W. Kuhn, Dr. G. Gensler und Dr. H.W. Courvoisier an der MZA für die Hilfe bei der Lösung meteorologischer Probleme,

Herrn M. Haug, Chef EDV der MZA, für die Datenbereitstellung im Eidg. Rechenzentrum in Bern,

Herrn Dr. F. Mäder für die wertvollen Hinweise und die Mithilfe bei der graphischen Gestaltung der Abbildungen

und den Betreuern der Rheintaler Beobachtungsstationen

Fräulein M. Wermelinger, Bad Ragaz
Herren Ph. Gort und St. Sutter, Pfäfers
Herrn J. Frei, Landquart
Herrn E. Graf, Räfis/Buchs und
Herrn F. Wille, Balzers für ihre zuverlässige Arbeit.

Im weiteren danke ich allen Beamten und Angestellten der MZA, welche durch ihre Teilnahme an der Reihenuntersuchung oder ihre sonstige Hilfsbereitschaft am Entstehen dieser Arbeit mitbeteiligt waren.

Zürich, Januar 1970

Thomas Gutermann

ZUSAMMENFASSUNG

Im ersten Teil dieser Arbeit wird die praktische Anwendbarkeit der Diskriminanzanalyse (Trennverfahren) von FISHER zur Bestimmung der Beobachtungstermine mit Föhn geprüft. Die Untersuchungen werden mit den Daten der Station Bad Ragaz durchgeführt; zu Vergleichszwecken findet zudem die Station Altdorf Verwendung. Als bestgeeignete Merkmale für die Abtrennung der Föhnfälle erweisen sich Windrichtung, Windstärke, Temperatur und relative Feuchtigkeit des betreffenden Ortes. Eine zusätzliche Verwendung grossräumiger Variablen (z. B. Druckgradient Alpensüd-/Alpennordseite) bringt keine Verbesserung. Dagegen kann durch geeignete Modifikationen der Ausgangsvariablen die Trennung der Föhn- von den Nichtföhnterminen gesteigert werden. So sind unter anderem Windrichtung und -stärke zu einem gemeinsamen Windmass zusammengefasst sowie bei der Temperatur und der Feuchtigkeit der mittlere Tages- und Jahresgang ausgeschaltet. Von den drei Variablen der Trennfunktion liefert das Windmass für Bad Ragaz und Altdorf aufgrund seiner guten Trenneigenschaft den grössten Anteil an das resultierende Föhnmass. Um der Temperatur und vor allem der Feuchtigkeit ein stärkeres Gewicht zu verleihen, werden die Grenzfälle (ca. 10 % aller Termine) mit einer zweiten Trennformel, welche nur diese beiden Variablen berücksichtigt, ein weiteres Mal getestet. Die mit Hilfe von Stichproben bestimmten Trennformeln sind ortsspezifisch und können daher nicht für beliebige andere Orte verwendet werden. Die gestaffelte Anwendung zweier Trennformeln bewirkt eine Erhöhung der Genauigkeit des Verfahrens: Auf diese Weise werden pro Jahr durchschnittlich 11 Termine mit und 4 ohne Föhn (total 1,5 % aller Fälle) falsch klassifiziert. Ein Vergleich mit der Föhnbestimmung durch 14 Fachleute zeigt, dass die Erfolgsrate des statistischen Verfahrens dieselbe Grössenordnung wie die durchschnittliche subjektive Beurteilung aufweist. Daher ist die Verwendung der Resultate für klimatologische Untersuchungen gerechtfertigt.

Anschliessend werden mit der erwähnten Methode für die beiden Stationen (Bad Ragaz: Reihe 1939-1968; Altdorf: Reihe 1901-1968) die Föhnvorkommen bestimmt: Es ergibt sich für den gemeinsamen Zeitraum ein im wesentlichen paralleler Verlauf sowohl der jährlichen als auch der jahreszeitlichen Föhnhäufigkeiten. Der Vergleich der beiden Stationen zeigt, dass im Rheintal die Föhn Auswirkungen (Temperaturerhöhung, Rückgang der relativen Feuchtigkeit und Windstärke) weniger ausgeprägt sind. Dagegen ist in Bad Ragaz verglichen mit Altdorf eine 1,8 mal grössere Föhnhäufigkeit festzustellen.

Im zweiten Teil werden erste Ergebnisse einer mesoklimatischen Föhnuntersuchung im Rheintal zwischen Chur und Buchs SG mitgeteilt. Erstmals stehen aus einem schweizerischen Föhnthal mit den Stationen Fläscherberg (450 m/Talgrund) und Pizalun (950 m/Talgrund) zweijährige Windregistrierungen von Messorten in mittlerer Höhenlage zur Verfügung. Diese beiden Stationen verzeichnen verglichen mit Bad Ragaz etwa doppelt so häufig eine ausgeprägte Föhnströmung, wobei vom Fläscherberg hinauf zum Pizalun nur eine geringe Zunahme festzustellen ist. Im Talgrund ergibt sich talabwärts ab Sargans eine rasche Abnahme der Föhnhäufigkeit und gleichzeitig eine Verstärkung der Föhn Auswirkungen. Es lässt sich zeigen, dass die weniger ausgeprägten Föhneigenschaften zwischen Chur und Sargans durch die Beimischung von aus den Bündnertälern ausfliessender Kaltluft verursacht werden.

RÉSUMÉ

Dans la première partie du présent mémoire, on examine si l'analyse par discrimination (procédé de séparation) selon FISHER peut s'appliquer en pratique à la détermination des délais d'observation où le foehn souffle. Cet essai est basé sur les relevés de la station de Bad Ragaz. Dans un but de comparaison, on a également utilisé la station d'Altdorf. Les paramètres les mieux appropriés pour la détermination des cas de foehn sont les suivants: Direction du vent, force de celui-ci, température et humidité relative mesurées à l'endroit lui-même. L'utilisation supplémentaire de variables concernant un vaste espace (tel que le gradient de pression entre le sud et le nord des Alpes par exemple) n'apporte pas d'amélioration. Il est par contre possible d'améliorer la séparation entre les délais d'observation avec foehn de ceux qui en sont exempts en modifiant les variables de départ de façon appropriée. On a entre autres réuni la direction et la force du vent en un seul facteur de vent et les évolutions journalière et annuelle moyennes ont été éliminées pour la température et l'humidité relative. Des trois variables de la fonction de discrimination, c'est le facteur vent qui a plus de poids dans la valeur "foehn" qui en résulte et cela en raison-même de ses bonnes qualités de discriminant et cela aussi bien pour Bad Ragaz que pour Altdorf. Pour conférer à la température et surtout à l'humidité relative un poids plus important, on examine à nouveau les cas-limite (environ 10 % des délais d'observation) à la lumière d'une seconde formule de séparation qui ne tient compte que de ces deux variables. Les formules de discrimination établies par échantillonnage sont spécifiques à chaque endroit et ne sauraient, par conséquent, être appliquées à d'autres stations d'observation. L'utilisation successive de deux formules de séparation a pour conséquence une augmentation de la précision du procédé. Par ce moyen, 11 délais avec foehn et 4 sans (soit 1,5 % de tous les cas) sont encore mal classés en moyenne par année. Une comparaison avec la détermination du foehn faite par 14 personnes du métier, montre que la proportion d'exactitude du procédé statistique est du même ordre de grandeur que la moyenne de la détermination subjective. Par conséquent, l'utilisation des résultats à des fins climatologiques est parfaitement justifiée. On détermine ensuite les cas de foehn des deux stations mentionnées en utilisant la dite méthode (Bad Ragaz 1939 à 1968, Altdorf 1901 à 1968). Il en résulte, pour la période commune, une fréquence de foehn en général similaire aussi bien en ce qui concerne l'année entière que les différentes saisons. La comparaison des deux stations montre que les effets du foehn (hausse de la température, baisse de l'humidité relative et force du vent) sont moins marqués dans la vallée du Rhin que dans celle de la Reuss. On note par contre une fréquence de foehn 1,8 fois supérieure à Bad Ragaz qu'à Altdorf.

Dans la seconde partie du travail, on présente les résultats d'une recherche mésoclimatologique sur le foehn dans la vallée du Rhin entre Coire et Buchs SG. Pour la première fois, on dispose dans une vallée suisse sujette au foehn de deux ans d'enregistrement du vent provenant de stations de mesure situées l'une à un niveau intermédiaire (Fläscherberg à 450 m au-dessus du fond de la vallée) l'autre plus élevée (Pizalun à 950 m au-dessus du fond de la vallée). Ces deux points présentent, par rapport à Bad Ragaz, une fréquence double du courant de foehn typique. Pourtant, l'augmentation est faible en passant du Fläscherberg au Pizalun. Dans le fond de la vallée en aval de Sargans, on constate une rapide diminution de la fréquence du foehn, mais, simultanément, une amplification de ses effets. On peut en outre démontrer que si les caractéristiques du foehn sont moins prononcées entre Coire et Sargans, c'est par suite d'un mélange entre le courant de foehn proprement dit et de l'air froid qui s'écoule des vallées latérales dans la vallée principale.

RIASSUNTO

Nella prima parte di questo lavoro viene esaminata l'applicazione pratica dell'analisi di discriminazione (procedimento di separazione) di FISHER per la determinazione dei termini di osservazione con favonio. Le ricerche vengono eseguite con i dati della stazione di Bad Ragaz; per ragioni di confronto viene pure utilizzata la stazione di Altdorf. Quali parametri più adatti per la separazione dei casi con favonio risultano la direzione e l'intensità del vento, la temperatura e l'umidità relativa del luogo considerato. L'utilizzazione complementare di variabili concernenti un vasto spazio (per esempio il gradiente barometrico Sud delle Alpi/Nord delle Alpi) non apporta un miglioramento. Invece mediante una modifica appropriata delle variabili di partenza, è possibile aumentare la separazione tra i termini con favonio e i termini senza favonio. Così fra altro direzione e intensità del vento furono raccolte in un unico fattore per il vento; per la temperatura e l'umidità relativa furono eliminati l'andamento medio giornaliero e annuale. Delle tre variabili della funzione di separazione il fattore vento per Bad Ragaz e Altdorf fornisce, grazie alla sua buona qualità di separazione, la maggior partecipazione al fattore favonico risultante. Per dare alla temperatura e specialmente all'umidità un maggior peso i casi limite (ca. 10 % di tutti i termini), vengono nuovamente esaminati con una seconda formula di separazione che contiene solo queste due variabili. Le formule di separazione, determinate con prove singole, sono specifiche per il luogo e perciò non possono essere utilizzate per altre località. L'applicazione successiva di due formule di separazione provoca un aumento dell'esattezza del procedimento: in questo modo per anno in media vengono ancora classificati erroneamente 11 termini con e 4 senza favonio (totale 1.5 % di tutti i casi). Il confronto con la determinazione del favonio, eseguita da 14 persone del mestiere, mostra che la proporzione di esattezza del procedimento statistico è dello stesso ordine di grandezza della media delle determinazioni soggettive. Con ciò l'applicazione dei risultati per le ricerche climatologiche è giustificata.

In seguito, con il metodo ricordato, vengono determinati i casi con favonio per entrambe le stazioni (Bad Ragaz: serie 1939-1968; Altdorf: serie 1901-1968). In complesso per il periodo comune si trova un andamento simile per la frequenza del favonio tanto per l'anno quanto per le stagioni. Il confronto delle due stazioni, mostra che nella valle del Reno gli effetti del favonio (aumento della temperatura, diminuzione dell'umidità relativa e intensità del vento) sono meno pronunciati, mentre a Bad Ragaz si trova una frequenza del favonio di 1.8 volte superiore a quella di Altdorf.

Nella seconda parte vengono comunicati i primi risultati di una ricerca mesoclimatica del favonio nella Valle del Reno, tra Coira e Buchs SG. Per la prima volta in una vallata svizzera con favonio con le stazioni di Fläschberg (450 m/fondo valle) e Pizalun (950 m/fondo valle), sono a disposizione due anni di registrazioni del vento con misure a medie altitudini. Entrambe queste stazioni, confrontate con Bad Ragaz presentano una corrente favonica pronunciata con una frequenza circa doppia; da Fläschberg in su verso Pizalun si constata solo un aumento insignificante. Sul fondo valle, scendendo lungo la valle, a cominciare da Sargans si constata una rapida diminuzione della frequenza del favonio, ma contemporaneamente una intensificazione degli effetti del favonio. Si può dimostrare che le proprietà favoniche meno pronunciate tra Coira e Sargans, sono dovute alla miscela della corrente favonica con l'aria fredda proveniente dalle vallate grigionesi laterali.

SUMMARY

In the first part of this study the practical applicability of FISHER's discriminant analysis regarding the determination of foehn observations is examined. The investigations are carried out with the data of the station located at Bad Ragaz; in order to draw a comparison, the station of Altdorf was also taken into account. Most suitable characteristics for separating the cases of foehn were wind direction, wind speed, temperature and relative humidity of the stations in question. An additional utilization of large-scale variables (e.g. pressure gradient between the southern and northern side of the Alps) does not produce any improvement. On the other hand, the separation of scheduled observations with foehn from those without foehn may be improved by appropriate modifications of the initial variables. Thus, wind direction and wind speed are combined to form a common wind index, and regarding temperature and humidity the mean diurnal and annual variations are excluded. Among the three variables of the discriminant function the wind index furnished the largest portion of the resulting foehn index on account of its excellent dividing quality. In order to stress the importance of temperature, and especially of humidity, the marginal cases (ca. 10 % of all observations) are tested again with a second discriminant function, which includes only these two variables. The discriminant functions determined on the basis of samples are specific to one station and therefore cannot be applied to any other places. The use of two functions in steps induces an increased accuracy of the process: thus, an average of just eleven scheduled observations per annum with foehn and four without foehn (totally 1.5 % of all cases) were classified in a wrong way. A comparison with the determination of foehn by fourteen specialists in synoptics proves that the rate of success of the statistical method shows the same order of magnitude as the average subjective approach. The application of the results for climatological researches is therefore justified. Subsequently the existence of foehn is determined by the above mentioned method for both stations (Bad Ragaz: period of record 1939-1968; Altdorf: period of record 1901-1968). It follows that for the period in common the course of the annual as well as the seasonal frequency of foehn is an essentially parallel one. A comparison of both stations shows that in the Valley of the Rhine the effects of foehn (rise of temperature, reduction of relative humidity and increase of wind speed) are not so distinct. On the contrary, a frequency of foehn 1.8 times higher than in Altdorf can be stated at Bad Ragaz.

In the second part of the study the first results of a mesoclimatic foehn research in the Valley of the Rhine, between Chur and Buchs SG, are presented. It is the first time that biennial anemograph records from stations at medium altitudes in a Swiss foehn valley - with the stations Fläschberg (450 m [1500 ft] above mean valley level) and Pizalun (950 m [3100 ft] above mean valley level) - are available. In comparison with Bad Ragaz, both of these stations record a typical foehn current about twice as frequent, whereby only a small increase up from Fläschberg to Pizalun is observed. On the valley floor, starting from Sargans, there is a significant decrease of the foehn frequency but at the same time an increase of the effect of foehn. It is possible to show that the cause why the characteristics of foehn are less distinct between Chur and Sargans lies in an entrainment of cold air flowing out of the Grison valleys.

I. STATISTISCHE VERFAHREN UND AUTOMATISCHE DATENVERARBEITUNG

Nachfolgend seien die wichtigsten, in dieser Arbeit zur Anwendung gelangenden statistischen Verfahren kurz erwähnt. Für ausführliche Beschreibungen wird in den entsprechenden Abschnitten auf die Fachliteratur verwiesen.

1. Beurteilung von Häufigkeitsverteilungen

Bei der statistischen Bearbeitung nimmt die Untersuchung von Häufigkeitsverteilungen bestimmter Datengruppen eine wichtige Stellung ein. So können beispielsweise die Verteilungen von Stichproben untereinander oder mit derjenigen der Grundgesamtheit verglichen werden. Verteilungsbilder erlauben vielfach auch eine Beurteilung der Homogenität der Stichprobe.

Da vielen statistischen Verfahren bestimmte theoretische Verteilungen (häufig die GAUSS'sche Normalverteilung) zugrunde liegen, sollten bei der Anwendung solcher Methoden meist im Zusammenhang mit der Aufbereitung des Datenmaterials entsprechende Verteilungsuntersuchungen durchgeführt werden. Durch graphische Darstellung in Form von Häufigkeitspolygonen oder Histogrammen wird eine erste qualitative Beurteilung möglich. Bei grösseren Datenmengen kann der Arbeitsaufwand durch den Einsatz einer Datenverarbeitungsanlage wesentlich verkleinert werden. Da in der vorliegenden Arbeit häufig ein Vergleich zweier Gruppen durchgeführt werden muss, wurde ein Programm in FORTRAN IV erstellt, welches in einem Diagramm zusammengefasst (vgl. z. B. Abb. 1) die Verteilungen der beiden Stichproben liefert. Um ein Ueberlappen der Gruppen zu vermeiden, gelangen die Häufigkeiten der zweiten Stichprobe spiegelbildlich nach unten zur Darstellung. Im Hinblick auf das Trennverfahren werden gleichzeitig die Mittelwerte und Streuungen berechnet und die jenseits des Durchschnittswertes ($\bar{X}$) der beiden Gruppenmittel liegenden Fälle beider Gruppen ausgezählt. Das Verhältnis dieser Falschklassifikationen zu der Anzahl der auf der günstigen Seite der Mittellinie ($\bar{X}$) liegenden Fälle liefert in einem Arbeitsgang zusätzlich zur qualitativen Beurteilung der Gruppenverteilungen auch ein Mass für die Trennschärfe des betreffenden Merkmals. Die Merkmalsskala (GG, Mitte der Diagramme, vgl. Abb. 1, 3, 6, 7a-c und 8) erlaubt aus Platzgründen nur den Ausdruck von Werten ≤ 100 mit höchstens einer Dezimalstelle. Um die Anwendbarkeit des Programms nicht einzuschränken, musste eine additive Konstante (GX) eingeführt werden, welche automatisch berechnet und im Diagramm rechts oben ausgedruckt wird. An gleicher Stelle ist auch die Variableneinheit von GG in Zehnerpotenzen (z. B. 10^{**2} Meter = 10^2 Meter = 100 Meter) ersichtlich.

Mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests (KREYSZIG¹⁷, LINDER²⁰, WEBER³³ u. a.) kann nun beurteilt werden, ob diese Gruppenverteilungen signifikant von einer bestimmten theoretischen Verteilung abweichen.

2. Regression und Korrelation

Diese beiden grundlegenden Verfahren sind in jedem statistischen Werk beschrieben (WEBER³³, HASELOFF¹⁴ u. a.)

Die Formel für die multiple lineare Regression lautet:

$$y = a + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n \quad (1)$$

wo: y = abhängige Variable
 x_i = unabhängige Variable i
 b_i = Regressionskoeffizient der Variablen i
 a = Konstante

Für Korrelationsanalysen wird meist der Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient von PEARSON (r) verwendet, welcher wie folgt definiert ist:

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1) \cdot s_x \cdot s_y} \quad (2)$$

wo: r_{xy} = Korrelationskoeffizient zwischen den Variablen x und y

s_{xy} = Kovarianz der Variablen x und y

s_i = Standardabweichung der Variablen i

Dieses Mass erlaubt jedoch nur eine Beurteilung des linearen Zusammenhangs zwischen den Variablen x und y .

Bei nichtlinearen Beziehungen können Rangkorrelationen wertvolle Aufschlüsse liefern. So werden im Teil III Tau-Koeffizienten (nach KENDALL) berechnet und verglichen. Die Bestimmung dieses Masses gegenseitiger Abhängigkeit ist bei HASELOFF-HOFFMANN¹⁴, p. 120 ausführlich erläutert.

3. Das Trennverfahren (lineare Diskriminanzanalyse)

Ausführliche Beschreibungen des von R.A. FISHER entwickelten Trennverfahrens und damit zusammenhängender Probleme finden sich bei LINDER²⁰ und WEBER³³. Eine kurze Zusammenfassung soll jedoch die später bei der Anwendung dieser Methode auftretenden Grössen erklären. Dabei stütze ich mich im wesentlichen auf die beiden erwähnten Quellen; die Symbolik wird von WEBER übernommen.

Zweck und Grundgedanke

Ziel des Trennverfahrens ist die bestmögliche Trennung verschiedener Gruppen (Gesamtheiten). Ausserdem sollen mit Hilfe einer oder mehrerer Formeln (= Trennfunktionen) Einzelbeobachtungen (Elemente) der nächstverwandten Gruppe zugeordnet werden können. Dieses Verfahren verlangt, dass mindestens ein Teil der Beobachtungen bereits gruppiert vorliegt. Vollständig ungruppiertes Datenmaterial muss vorgängig auf eine andere Art (z.B. Distanzgruppierung, subjektive Abgrenzung) in Gruppen eingeteilt werden. Diese Gruppen können nun mit dem Trennverfahren geprüft, durch Austausch von Einzelbeobachtungen verbessert und durch Zuteilung neuer Fälle erweitert werden.

Sind die Einzelbeobachtungen nur durch ein oder zwei Merkmale bestimmt (z.B. Temperatur und/oder relative Feuchtigkeit), so bietet eine Gruppenbildung keine speziellen Probleme. Sobald jedoch die Anzahl verschiedener Merkmale ansteigt, wird die objektive Berücksichtigung aller Variablen schwierig. Hier setzt die Hilfe des Trennverfahrens ein, indem dieses erlaubt, die Bedeutung der verschiedenen Merkmale im Hinblick auf eine möglichst gute Trennung objektiv aufgrund statistischer Kriterien zu bestimmen. Bedingung ist allerdings, dass die einzelnen Merkmale (Variablen) in den Gruppen zumindest näherungsweise normalverteilt sind, da die Gruppenparameter Mittelwert und Streuung eine zentrale Bedeutung haben und die Berechnung der Mutmasslichkeit der Gruppenzugehörigkeit auf dieser Annahme beruht.

Symbolik

Jeder ermittelte Messwert sollte je einen Index für die Gruppenzugehörigkeit (g), die Bezeichnung des Merkmals (i) sowie für die Festlegung der Beobachtungsnummer (j) innerhalb der Gruppe in folgender Anordnung besitzen:

$$x_{ij}^g$$

Der Uebersichtlichkeit halber wird der Beobachtungsindex j weggelassen. So erhält jede Beobachtung aus einer dritten Gruppe bei vier Merkmalen (Variablen) folgende Form:

$$x_1^3, x_2^3, x_3^3, x_4^3$$

3.1. Berechnung der linearen Trennfunktionen

Bedingung für gute Trennung

Je weiter die einzelnen Beobachtungen einer bestimmten Variablen und damit deren Gruppenmittelwerte (bei gleichbleibender Streuung) auseinander liegen, desto besser eignet sie sich für die Trennung dieser Gruppen. Die gleiche vorteilhafte Wirkung ergibt sich bei einer Abnahme der Streuungen innerhalb der Gruppen (bei gleichbleibenden Mittelwerten). Diese beiden Bedingungen für eine gute Trennung lassen sich formelmässig folgendermassen fassen:

$$V_i = \frac{d_i}{v_i} = \frac{\frac{-1}{x_i^1} - \frac{-2}{x_i^2}}{\frac{1}{q_{ii}^1} + \frac{2}{q_{ii}^2}} = \text{Maximum} \quad (3)$$

wo: $\bar{x}_i^g$ = Mittelwert des i-ten Merkmals der Gruppe g

q_{ii}^g = Varianz des i-ten Merkmals der Gruppe g

Je grösser das Verhältnis V_i , desto besser eignet sich das Merkmal i (Variable i) für die Trennung.

3.1.1. Trennung zweier Gruppen (einfache Trennfunktion)

Das Rechenmass X, Bestimmung der Faktoren b_i

Wie bereits erwähnt, sollen die m Merkmale einer Beobachtung gesamthaft für die Gruppierung beurteilt werden können. Dies wird durch folgenden Ansatz einer linearen Gleichung angestrebt:

$$X = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_m \cdot x_m \quad (4)$$

Die verschiedenen Merkmale x_i einer Beobachtung werden mit einem merkmalseigenen Faktor b_i multipliziert. Durch Addition der m Produkte erhält man die Grösse X, welche WEBER³³ als *Rechenmass* bezeichnet. Im Rechenmass X sind also alle in der Trennformel berücksichtigten Merkmale einer Beobachtung zusammengefasst. Der Wert von X entscheidet in der Folge über die Gruppenzugehörigkeit.

Die Koeffizienten b_i sollen nun so bestimmt werden, dass die Trennung der Rechenmasse X^a und X^b (bei zwei Gruppen a und b) optimal wird. Dies ist dann der Fall, wenn V_x in Gleichung (3) maximal wird.

Damit verschiedene Merkmale einer Beobachtung (z. B. Temperaturen und Luftdruckwerte) sinnvoll addiert werden können, müssen in den Faktoren b_i die folgenden Eigenschaften der einzelnen Variablen berücksichtigt sein:

1. Trennschärfe

Nicht jede Variable vermag für sich allein zwei Gruppen gleich gut zu trennen. Der Faktor b_i muss der besser trennenden Variablen ein grösseres Gewicht verleihen.

2. Dimension

Es können nur Grössen gleicher Dimension addiert werden. Den Faktoren b_i werden deshalb formal die reziproken Dimensionen ihrer Merkmale zugeteilt, sodass die Summanden $(b_i \cdot x_i)$ und damit auch das Rechenmass X zu dimensionslosen Grössen werden.

3. Absolutbetrag

Die möglichen Unterschiede der Absolutwerte der verschiedenen Variablen (z.B. Luftdruck von 700 bis 750 mm Hg und Temperatur von -10 bis +30 Grad Celsius) müssen durch die Faktoren b_i ausgeglichen werden.

Die Berechnung der Koeffizienten b_i (durch partielle Differentiation von (3) werden die entsprechenden Bestimmungsgleichungen erhalten) ist bei LINDER²⁰ und WEBER³³ beschrieben.

3.1.2. Trennung mehrerer Gruppen (gruppeneigene Trennfunktionen)

Das Mutmasslichkeitsmass M^g , Bestimmung der Faktoren b_i^g

Für den allgemeineren Fall von k Gruppen existiert ein von COOLEY⁵ beschriebenes Verfahren, welches auf dem Prinzip der maximalen Mutmasslichkeit ("maximum likelihood") beruht, und wo für jede Gruppe g eine eigene Trennfunktion der Form

$$M^g = b_1^g \cdot x_1 + b_2^g \cdot x_2 + \dots + b_m^g \cdot x_m + C^g \quad (5)$$

zur Anwendung gelangt. Für jede Gruppe werden hier also besondere Koeffizienten und zusätzlich je eine gruppeneigene Konstante C^g berechnet. Die mit Hilfe dieser Parameter berechnete Grösse M^g ist direktes Mass für die Mutmasslichkeit der Zugehörigkeit zur Gruppe g .

Werden von den k Gruppen nur zwei beliebige Gruppen a und b betrachtet, so lassen sich die beiden Trennfunktionen

$$M^a = b_1^a \cdot x_1 + b_2^a \cdot x_2 + \dots + b_m^a \cdot x_m + C^a \quad (5a)$$

$$\text{und} \quad M^b = b_1^b \cdot x_1 + b_2^b \cdot x_2 + \dots + b_m^b \cdot x_m + C^b \quad (5b)$$

leicht in eine einfache Trennfunktion gemäss Formel (4) überführen.

Liegen die Beobachtungswerte x_i^* bei allen m Merkmalen genau zwischen den zugehörigen Gruppenmittelwerten (also $x_i^* = (\bar{x}_i^a - \bar{x}_i^b) / 2$), so sind die Mutmasslichkeiten M^a und M^b gleich gross. Die Trennformeln (5a) und (5b) können einander gleichgesetzt werden:

$$b_1^a \cdot x_1^* + b_2^a \cdot x_2^* + \dots + b_m^a \cdot x_m^* + C^a = b_1^b \cdot x_1^* + b_2^b \cdot x_2^* + \dots + b_m^b \cdot x_m^* + C^b$$

daraus folgt:

$$b_1 \cdot x_1^* + b_2 \cdot x_2^* + \dots + b_m \cdot x_m^* = X^* \quad (6)$$

$$\text{wo: } b_i = b_i^a - b_i^b$$

$$x_i^* = (\bar{x}_i^a - \bar{x}_i^b) / 2$$

$$X^* = C^b - C^a \quad (6a)$$

3.2. Bestimmung der Zugehörigkeit einer Beobachtung zu einer Gruppe

a) aufgrund des Rechenmasses X :

Da bei den angenommenen Merkmalswerten x_i^* in Formel (6) die Gruppenzugehörigkeit zu beiden Gruppen dieselbe ist, handelt es sich bei X^* in (6a) um den Grenzwert, welcher die Rechenmasse X^a und X^b optimal voneinander trennt. Mit Hilfe dieses Grenzwertes X^* kann daher ein von einer noch nicht zugeordneten Beobachtung stammendes Rechenmass X (und damit die Beobachtung selbst) einer der beiden Gruppen a oder b zugeteilt werden.

b) aufgrund des Mutmasslichkeitsmasses M^g :

Soll bei z. B. vier Gruppen eine bestimmte Beobachtung einer dieser Gruppen zugeteilt werden, so erhält man unter Anwendung der vier Trennfunktionen (vgl. Formel (5) vier Mutmasslichkeitswerte M^g ($g = 1$ bis 4); die Beobachtung gehört dann in jene Gruppe, für welche das grösste M^g ($=M^{\max}$) errechnet wurde.

Aus diesen k M^g -Werten lässt sich die Wahrscheinlichkeit P^a der Zugehörigkeit zur Gruppe a nach folgender Formel berechnen:

$$P^a = \frac{1}{\sum_{i=1}^k e^{(M^i - M^a)}} \quad (7)$$

D. h. je weiter die kleineren M^g -Werte vom maximalen Mutmasslichkeitsmass $M^{\max}$ entfernt sind, desto näher bei 1 liegt die Summe im Nenner von (7) (welche in jedem Fall aber grösser als 1 ist) und desto grösser ist demzufolge die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit der Beobachtung zur Gruppe mit maximalem M^g .

Für den Fall von nur zwei Gruppen a und b ($k=2$) folgt aus (7):

$$P^a = \frac{1}{e^{(M^a - M^a)} + e^{(M^b - M^a)}} = \frac{1}{1 + e^{(M^b - M^a)}} \quad (8a)$$

und:

$$P^b = \frac{1}{e^{(M^a - M^b)} + 1}$$

also ist: $P^a + P^b = 1$ (für den allgemeinen Fall von k Gruppen:

$$\sum_{g=1}^k P^g = 1)$$

Für die einfache Trennformel ergibt sich:

$$P^a = \frac{1}{1 + e^{-X'}} \quad (8b) \quad \text{und} \quad P^b = 1 - P^a$$

wo: $X' = X - X^*$ = Rechenmass mit Grenzwert Null
 X = Rechenmass mit Grenzwert X^*

3.3. Prüfung, ob die einzelnen Gruppen aus verschiedenen Grundgesamtheiten stammen

Es werden je zwei Gruppen miteinander verglichen. Ist der Abstand d_X der Gruppenmittel $\bar{X}^g$ der Rechenmasse mit einer Wahrscheinlichkeit p signifikant von 0 verschieden, so kann angenommen werden, dass die beiden Gruppen mit der gleichen Sicherheit aus verschiedenen Grundgesamtheiten stammen. Für den Mittelwertsabstand d_X gilt (wie bei LINDER²⁰ oder WEBER³³ hergeleitet wird):

$$d_X = \bar{X}^1 - \bar{X}^2 = b_1 \cdot d_1 + b_2 \cdot d_2 + \dots + b_m \cdot d_m \quad (9)$$

wo: $d_i = \bar{x}_i^1 - \bar{x}_i^2$ = Abstand der Gruppenmittel der Variablen i

b_i = Koeffizient der Trennformel für die Variable i
(vgl. (6)!))

Bei der Prüfung der Nullhypothese muss nach LINDER²⁰, p. 244, die Grösse F berechnet werden:

$$F = \frac{n^1 \cdot n^2 (n^1 + n^2 - m - 1)}{m (n^1 + n^2)} \cdot d_X \quad (9a)$$

wo: n^g = Anzahl Beobachtungen der Gruppe g
 m = Anzahl der miteinbezogenen Variablen
 p = Irrtumswahrscheinlichkeit
 F_1 = Freiheitsgrad 1 (= m)
 F_2 = Freiheitsgrad 2 (= $n^1 + n^2 - m - 1$)

F folgt einer theoretischen F -Verteilung $\Phi(p; F_1, F_2)$. Für $F > \Phi(p; F_1, F_2)$ ist d_X und damit auch mindestens einer der Gruppenmittelwertsabstände d_i der Variablen signifikant von 0 verschieden. Die Nullhypothese muss abgelehnt werden; die beiden Gruppen stammen aus verschiedenen Grundgesamtheiten.

3.4. Beurteilung der Bedeutung der einzelnen Variablen für die Trennung der Gruppen

Erste Uebersicht

Der t -Test von STUDENT erlaubt durch einen Vergleich der Gruppenmittelwerte der einzelnen Variablen unter Mitberücksichtigung der Streuung der Einzelbeobachtungen eine Beurteilung, ob die entsprechenden Mittelwerte mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit p signifikant verschieden sind. Das Verfahren wird in jedem einschlägigen Statistikwerk beschrieben. Nach LINDER²⁰ folgt jedoch nicht ohne weiteres, dass sich jene Variablen mit signifikanter Mittelwertsdifferenz für die Trennformel eignen. Ausserdem kann daraus nicht geschlossen werden, dass die übrigen Variablen mit Sicherheit für eine Trennung ungeeignet sind. Im Normalfall ist jedoch bei einer Variablen mit grösserer Signifikanz der Mittelwertsdifferenz auch die Trennung und damit die Eignung für die Trennformel besser.

Prüfung, ob der Einbezug von zusätzlichen Variablen eine Verbesserung der Trennung bewirkt

Als Mass für die Güte der Trennung dient hier auch der Mittelwertsabstand d_X der Rechenmasse (vgl. Formel (9)). Ist der Zuwachs von d_X bei Verwendung von z weiteren Variablen signifikant von 0 verschieden, liefern die neuen Variablen einen zu berücksichtigenden zusätzlichen Beitrag an die Trennung. Auch hier handelt es sich also um die Prüfung einer Nullhypothese. Dabei ist gemäss LINDER²⁰, p. 245, die Grösse F , welche einer theoretischen F -Verteilung $\Phi(p; F_1, F_2)$ folgt, folgendermassen zu berechnen:

$$F = \frac{(n^1 + n^2 - m_1 - z - 1) \cdot (R - 1)}{z} \quad (10)$$

wobei für die Hilfsgrösse R gilt:

$$R = \frac{1+n^1 \cdot n^2 \cdot d_{m_2} / (n^1 + n^2)}{1+n^1 \cdot n^2 \cdot d_{m_1} / (n^1 + n^2)}$$

wo: n^g = Anzahl Beobachtungen der Gruppe g
 m_1 = Anzahl der miteinbezogenen Variablen bei der ersten Untersuchung
 m_2 = $m_1 + z$ = Anzahl der miteinbezogenen Variablen bei der zweiten Untersuchung
 z = Anzahl der zusätzlich beigezogenen Variablen
 $d_{(m_i)}$ = Mittelwertsabstand der Rechenmasse unter Verwendung von m_i Variablen
 p = Irrtumswahrscheinlichkeit
 F_1 = Freiheitsgrad 1 ($= z$)
 F_2 = Freiheitsgrad 2 ($= n^1 + n^2 - m_1 - z - 1$)

Für $F > \Phi(p; F_1, F_2)$ muss die Nullhypothese abgelehnt werden, d.h. mindestens eine der z zusätzlichen Variablen bewirkt eine signifikante Verbesserung der Trennung. Ist $z = 1$, betrifft diese Aussage diese eine neu hinzugekommene Variable. Auf diese Weise kann daher für jede Variable einzeln geprüft werden, ob sich deren Mitberücksichtigung bei der Bestimmung der Trennformel rechtfertigt.

4. Elektronische Datenverarbeitung

Die umfangreichen Rechenarbeiten wurden grösstenteils durch einen Computer gelöst. Dabei standen mir am Rechenzentrum der Universität Zürich ein Kleincomputer (IBM 1620) sowie die IBM-Anlage 360/40 zur Verfügung. Die Rechenprogramme für Korrelations-, Regressions- und Diskriminanzanalyse sowie für den Normalitätstest von Häufigkeitsverteilungen lagen in der Programmiersprache FORTRAN IV bereits vor. Sie wurden teilweise am Geographischen Institut durch Prof. D. Steiner (Diskriminanzanalyse) und Herrn Dorigo (Normalitätstest) aus der IBM-Software des Rechenzentrums zusammengestellt und bearbeitet.

Weitere Programme (Anwendung der Trennfunktionen auf das benützte klimatologische Datenmaterial, Vergleich zweier Histogramme u. a.) wurden von mir in FORTRAN IV erstellt.

Meinen besonderen Dank verdienen Fr1. Simonet sowie die Herren Constam, Dunkel und Baumann am Rechenzentrum für ihr Verständnis und ihre Hilfe bei der Lösung programmier-technischer Schwierigkeiten.

Das benötigte klimatologische Datenmaterial wurde in zuvorkommender Weise am Eidgenössischen Rechenzentrum in Bern zusammengestellt und auf Magnetband gespeichert, wodurch mir umfangreiche Locharbeiten erspart blieben.

II. BESTIMMUNG DER FÖHNTERMINE IN BAD RAGAZ MIT HILFE DES TRENNVERFAHRENS VON FISHER

1. Problemstellung

Bei Föhnuntersuchungen wirkt sich häufig das Fehlen einer allgemein anerkannten Föhndefinition nachteilig aus, weil dadurch nicht in jedem Falle eindeutig entschieden werden kann, ob zu einem festen Zeitpunkt an einem bestimmten Ort Föhn herrscht oder nicht. Die entsprechende Abgrenzung ist nicht in allen Föhntälern der Alpenordseite gleich schwierig. Während in Altdorf (Reusstal) meist eine klare Entscheidung möglich ist, treffen wir im Rheintal zwischen Sargans und Chur auf eine bemerkenswerte Anzahl von weniger ausgeprägten Föhnsituationen, welche von verschiedenen Fachleuten unterschiedlich beurteilt werden. Statistische Untersuchungen verlangen jedoch nach einer klaren Entscheidung. Es drängte sich daher im Anschluss an die Föhnuntersuchungen von WIDMER³⁰ der Wunsch auf, eine Methode zu entwickeln, welche eine objektive Abgrenzung der Föhnfälle erlaubt und welche auch in Gebieten mit weniger eindeutigen Verhältnissen erfolgreich angewendet werden kann. Es sind bis heute für bestimmte Föhngebiete in Oesterreich, Deutschland und der Schweiz bei Föhnuntersuchungen eine Reihe verschiedener Grenzwerte vorgeschlagen und auch angewandt worden, um aufgrund anerkannter Föhnkriterien wie Temperaturerhöhung, Abnahme der relativen Feuchtigkeit und spezielle Windverhältnisse Föhnfälle ausscheiden zu können. Während auf diese Art ein bestimmter Fall allein aufgrund einer einzelnen Variablen ausgeschieden werden kann, wenn diese jenseits des festgelegten Grenzwertes liegt, bietet sich mit der Diskriminanzanalyse von FISHER ein statistisches Verfahren an, welches eine gemeinsame Beurteilung aller miteinbezogenen Föhnmerkmale erlaubt.

Es sollen daher im folgenden für das Beobachtungsmaterial der Meteorologischen Station Bad Ragaz (täglich drei Terminbeobachtungen) die notwendigen Parameter der Trennfunktionen bestimmt werden, welche eine objektive Bestimmung der Föhntermine erlauben.

2. Untersuchungsmaterial

Für die Entwicklung eines praktisch anwendbaren Trennverfahrens (das Grundprinzip war durch die Diskriminanzanalyse von FISHER bereits vorgegeben) wurde die Beobachtungsstation Bad Ragaz aus dem Klimanetz der Schweiz ausgewählt. Sie liegt auf der linken Seite des in diesem Abschnitt von SE nach NW verlaufenden Rheintales am östlichen Dorfrand auf einer Höhe von 510 m/M. Trotz der hangnahen Lage scheinen keine wesentlichen Störungen aufzutreten. Einzig die Föhnströmung aus dem engen, wenig talabwärts von Süden einmündenden Vättnerthal macht sich in wenigen Fällen bemerkbar.

Mehrere Gründe waren für die Wahl dieser Station verantwortlich:

1. Sie wurde innerhalb des verwendeten Zeitraumes nur einmal geringfügig verlegt und wird zuverlässig betreut.
2. Die Abgrenzung von Föhnterminen weist hier einen mittleren Schwierigkeitsgrad auf. In Altdorf (Reusstal) sind mehr eindeutige Fälle, in Chur (oberes Rheintal) mehr Uebergangssituationen anzutreffen.
3. Das Beobachtungsmaterial ist seit 1939 auf Lochkarten aufgenommen und auf Magnetband gespeichert, sodass das entwickelte Verfahren an einer längeren Reihe ohne zu grossen Aufwand mit Hilfe eines Computers getestet werden konnte.

Beim Datenmaterial stehen die Terminbeobachtungen von Bad Ragaz (dreimal täglich um 07.30, 13.30 und 21.30 Uhr ausgeführt) für den Zeitraum 1939-68 im Vordergrund. Für die sub-

jektive Beurteilung aufgrund zusätzlicher Föhnkriterien wurden in erster Linie noch die folgenden Stationen beigezogen:

Stationen des Synoptischen Netzes (8 Beobachtungen täglich):

Locarno-Magadino, Alpensüdseite, 198 m/M.

Zürich-Kloten, Alpennordseite, 431 m/M.

Gütsch ob Andermatt, Alpenkammstation, 2284 m/M.

Meteorologische Station:

Säntis, Voralpengipfel, 2500 m/M., 6 Beobachtungen täglich

3. Bestimmung der Trennfunktionen unter ausschliesslicher Verwendung von Beobachtungsdaten des Anwendungsortes

Um einerseits eine Anwendung des zu gewinnenden Trennverfahrens auf andere Stationen zu erleichtern und ausserdem die automatische Bearbeitung der langen Reihen von Bad Ragaz (1939-68) und Altdorf (1901-68) möglich zu machen, erfolgt vorerst eine Beschränkung auf das Datenmaterial, welches vom Anwendungsort selbst stammt. Die Beobachtungen der weiter oben aufgeführten zusätzlichen Orte sind, soweit sie überhaupt über den ganzen Zeitraum existieren, erst teilweise der elektronischen Datenverarbeitung zugänglich.

3.1. Auswahl der Testgruppen

Für die Bestimmung der Trennfunktionen zur Aufgliederung der Beobachtungstermine in Föhn- und Nichtföhnfälle müssen zu Beginn je eine Testgruppe dieser zwei Möglichkeiten vorliegen.

Die Termine mit Föhn in Bad Ragaz (Gruppe A) wurden subjektiv aufgrund der qualitativ allgemein anerkannten Föhnkriterien (Temperaturerhöhung, gleichzeitige Abnahme der relativen Feuchtigkeit und südliche, infolge der Talrichtung meist südöstliche Windrichtung) ausgewählt. Dabei wurden Zweifelsfälle übergangen. Um auch den Jahresgang der Föhnkriterien untersuchen und soweit notwendig berücksichtigen zu können, entschloss ich mich für die Auswahl von 12 monatlichen Testgruppenpaaren zu 30 Fällen pro Gruppe (je zehn 7 Uhr, 13 Uhr und 21 Uhr Termine), total also 360 Föhntermine. Dies hatte zur Folge, dass in den föhnärmsten Monaten Juli und August bis ins Jahr 1946 zurückgegriffen werden musste, bis von jedem Termin genügend eindeutige Föhnfälle vorhanden waren.

Die Nichtföhnfälle (Gruppe B) bilden eine nichthomogene Gruppe der übrigen Beobachtungstermine, können doch als Alternative zum Föhn die verschiedensten Wetterlagen vorliegen. Aus diesem Grunde wurde aus sämtlichen Nichtföhnterminen der Jahre 1959-68 mit Hilfe einer Tafel mit zufällig angeordneten Zahlen (KREYSZIG¹⁷) eine Zufallsauswahl von monatlich 30 Testterminen (ebenfalls je zehn 7 Uhr, 13 Uhr und 21 Uhr Beobachtungen) getroffen. Für die so gebildeten 12 Testgruppenpaare waren für jeden Monat getrennt die Trennfunktionen zu berechnen und die einzelnen Termine auf ihre Gruppenzugehörigkeit hin zu prüfen. Irrtümlich zugeteilte Fälle wurden ersetzt, die Trennfunktionen neu berechnet und wiederum überprüft, bis keine Fehlklassifikationen mehr auftraten. Die so bereinigten Gruppen bildeten das Testmaterial für die weiteren Untersuchungen.

3.2. Bestimmung der für den Trennvorgang geeigneten Merkmale (Föhnkriterien)

Wenn, wie in unserem Falle, jeder Beobachtungstermin einzeln auf Föhn untersucht werden soll, stehen grundsätzlich für diesen Test alle Grössen zur Verfügung, welche am Beobachtungsort festgehalten werden. Es handelt sich dabei im wesentlichen um folgende Wetterelemente: Temperatur, Luftdruck und relative Feuchtigkeit, welche (wenn auch letztere mit dem Haarhygrometer nicht sehr genau) gemessen werden, ausserdem die Schätzung der Bewölkung in Zehnteln der Himmelsbedeckung sowie die mit der Wild'schen Windfahne bestimmte Richtung und Stärke des Windes, bei denen ebenfalls ein gewisser subjektiver Einfluss des Beobachters mitspielt.

Die weiteren Beobachtungen mussten ausgeschlossen werden, da sie nicht zu allen Terminen ausgeführt werden (Niederschlag, Sonnenschein, Sicht).



Abb. 1 Verteilung der relativen Feuchtigkeit innerhalb der beiden Testgruppen.

Da die Nichtföhnfälle nicht aus einem einheitlichen Kollektiv stammen, ist die Verteilung unregelmässiger als bei der Föhngruppe. Zudem wirken sich hier die tages- und jahreszeitlichen Schwankungen stärker aus.

Vergleich mit theoretischer Normalverteilung (Chi-Quadrat-Test bei möglichst günstiger Klassenzahl):

Gruppe A: 9 Klassen, Klassenbreite: 5,9 % p = 0.24

Gruppe B: 9 Klassen, Klassenbreite: 7,4 % p < 0.001

Gruppe B (Nichtföhn) weicht signifikant von einer theoretischen Normalverteilung ab.

Eine erste Untersuchung der sechs zunächst ausgewählten Elemente Temperatur, relative Feuchtigkeit, Luftdruck, Windrichtung, Windstärke und Bewölkung zeigte bald, dass in beiden Jahrestestgruppen (je 360 Fälle) unregelmässige Verteilungen vorliegen. Zur Illustration diene Abb. 1, welche die Verteilung der relativen Feuchtigkeit der beiden Gruppen zu Beginn der Untersuchung zeigt. Dabei zeichnet sich eine nicht sehr starke Trennung ab. Diese Trennung (d.h. der Abstand der Gruppenmittelwerte unter Berücksichtigung der Streuungen) lässt sich quantitativ am besten durch die Anwendung des t-Testes von STUDENT abschätzen, obgleich einzelne Variablen so stark von einer Normalverteilung abweichen, dass dieser streng genommen nicht angewendet werden dürfte. Für die einzelnen Merkmale ergaben sich (nach abnehmenden t-Werten geordnet) folgende Resultate:

Variable	Föhn (Gruppe A)		Nichtföhn (Gruppe B)		t-Wert	p
	Mittel	Streuung	Mittel	Streuung		
Relative Feuchtigkeit (%)	49	11	77	16	27.9	< 0.001
Windstärke (km/h)	22.2	10.2	6.5	5.9	25.0	< 0.001
Temperatur (°C)	14.8	7.6	8.0	8.5	11.4	< 0.001
Luftdruck (mm Hg)	714.4	6.8	717.7	5.2	7.4	< 0.001
Bewölkung (Zehntel)	5.2	3.8	6.6	4.0	4.8	< 0.001

Sämtliche Mittelwerte sind signifikant verschieden, wobei aufgrund der t-Werte die relative Feuchtigkeit, gefolgt von der Windstärke und der Temperatur die besten Trennchancen erahnen lassen. Auf die Windrichtung wurde der t-Test nicht angewendet, da der Sprung bei Nord von 360 auf 0 Grad Umrechnungen bedingt hätte, auf welche im Hinblick auf die im folgenden Kapitel beschriebene Windbearbeitung verzichtet wurde.

In den anschliessenden Abschnitten soll für die einzelnen Variablen nach Möglichkeiten gesucht werden, die Trennung der beiden Gruppen zu verbessern und mindestens eine angenäherte Normalverteilung zu erhalten.

3.2.1. Wind

Beim Wind liegen sowohl die Stärke- als auch die Richtungsangaben einer Meteorologischen Station in Form von ganzzahligen Grössen vor. Üblicherweise wird für die Richtung die achteilige Windrose verwendet, während die Stärke nach der halben Beaufortskala abgestuft ist. Daher treten acht verschiedene Richtungswerte und höchstens sieben Windstärken (0 bis 6) auf, wobei in Tallagen Windstärke 4 (halbe Beaufortskala = Sturm) kaum überschritten wird. Zwei Schwierigkeiten sind bei diesen beiden Windmerkmalen zu überwinden:

1. Die Windrichtung springt im Norden von 36 auf 0 Zehnergrade, was sich bei der Berechnung von Mittelwerten, Streuungen, Korrelationen und anderen statistischen Grössen störend bemerkbar macht.
2. Bei der Windstärke ist die Tatsache zu berücksichtigen, dass sich eine Zunahme der Geschwindigkeit nicht in beiden Gruppen gleich auswirkt. Bei den Föhnfällen resultiert daraus eine Erhöhung, bei den Nichtföhnfällen dagegen eine Reduktion der Föhnwahrscheinlichkeit.

Die erste Schwierigkeit kann in unserem Falle überwunden werden, indem statt der beobachteten Windrichtung die Abweichung von der Föhnhaupttrichtung des betreffenden Ortes (in Bad Ragaz SE) verwendet wird, nimmt doch die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um Föhn handelt, mit grösser werdender Abweichung ab. Letztere kann beidseitig maximal 180 Grad betragen, wobei keine Sprungstelle mehr auftritt, sofern wir die Richtung der Abweichung unberücksichtigt lassen. Wird die so berechnete Abweichung mit der Windstärke zu einem Vektor kombiniert, so wäre an sich auch die zweite Schwierigkeit behoben, indem bei Abweichungen über 90 Grad die Vektorkomponente in Föhnhaupttrichtung negativ wird. Nun treten aber den Ausgangsdaten zufolge auch bei den Abweichungen nur bestimmte Werte auf; diese können bei einer normalen Beobachtungsstation wie beispielsweise Bad Ragaz, welche acht Windrichtungen unterscheidet, nur 0, 45, 90, 135 oder 180 Grad betragen. Würden nun als Mass für die Föhnwahrscheinlichkeit die Vektorkomponenten in der Föhnhaupttrichtung verwendet, erhielten aufgrund der Winkelfunktionswerte die Richtungsänderungen von 0 auf 45 und von 135 auf 180 Grad das kleinere Gewicht, als jene von 45 auf 90 und von 90 auf 135 Grad, was den wirklichen Verhältnissen nicht gerecht wird.

Es wurde daher eine Windmasszahl eingeführt, welche die lineare Abweichung von der Föhnhaupttrichtung mit der gleichzeitig beobachteten Windstärke in einer Weise kombiniert, die der eingangs geschilderten zweiten Schwierigkeit gerecht wird. Diese Windkombinationsgrösse W (als quantitatives Mass für die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Windbeobachtung von einem Föhntermin stammt), sieht für die verschiedenen Abweichungen und Windstärken in Matrix-

darstellung folgendermassen aus:

Windstärke 1/2 Beaufort	Windrichtung in Ragaz	SE	E S	NE SW	N W	NW
	Abweichung von der Föhnhaupttrichtung	0	45	90	135	180 Grad
	ABWEICHUNGS- MASS D STAERKE- MASS F	1	2	3	4	5
0	0	12	13	14	15	16
1	1	10	12	14	16	18
2	2	8	11	14	17	20
3	3	6	10	14	18	22
4	4	4	9	14	19	24
5	5	2	8	14	20	26

Abb. 2 Matrix des Windmasses W

Dimensionslose Grösse, kombiniert aus Windrichtungsabweichung von der Föhnhaupttrichtung und Windstärke (in halben Beaufort).

Die Föhnhaupttrichtung (= mittlere Windrichtung bei Föhn) ist je nach Beobachtungsstation verschieden; in Bad Ragaz ist sie SE.

Das einer bestimmten Windrichtungsabweichung D (in Schritten von 45 Grad) und der zugehörigen Windstärke F (in halben Beaufort) entsprechende Windmass W kann mit folgender Formel errechnet werden:

$$F_D^W = 2 \cdot (6 - F) + (D - 1) \cdot (F + 1) \quad (3.1)$$

Dabei bedeutet also ein niedriger Wert dieser Windkombinationsgrösse eine erhöhte Föhnwahrscheinlichkeit, während hohe Werte gegen die Annahme sprechen, dass es sich um Föhn handelt.

Die vorliegende Festlegung der Absolutwerte und Intervallgrössen ist willkürlich. Jede andere Wahl der beiden Parameter [Wert für die stärkeunabhängige Normale zur Föhnhaupttrichtung (in unserem Falle 14) und Intervallgrösse (hier in der ersten Zeile 1, in der ersten Spalte 2)] liefert unter Wahrung der beidseitigen Linearität im Trennverfahren dieselben Ergebnisse, da das Verhältnis von Gruppenmittelwertsabstand zu den Streuungen unverändert bleibt.

Die Anwendung dieser Windkombinationsgrösse auf die beiden Jahrestestgruppen bewirkt eine wesentliche Verbesserung der Trennung:

	Föhn (Gruppe A)		Nichtföhn (Gruppe B)		t-Wert	p
	Mittel	Streuung	Mittel	Streuung		
kombiniertes Windmass	8.5	1.5	15.0	2.1	46.9	<0.001

Der hohe t-Wert weist darauf hin, dass sich diese neue kombinierte Grösse aus Windrichtung und -stärke für die Trennung von Föhn- und Nichtföhnfällen bestens eignen dürfte.

Im folgenden wird daher anstelle der beiden Windvariablen nur noch mit dieser einen Grösse gearbeitet. Sie wird der Einfachheit halber als Windmass W bezeichnet und ist dimensionslos, da sowohl Windstärke als auch Windrichtungsabweichung als Rangzahlen (F, resp. D) in die Gleichung (3.1) für W eingehen.

3.2.2. Temperatur

Die Verteilungen der Temperaturen innerhalb der Jahrestestgruppen zeigen einen breiten Gipfel und trennen nur schlecht. Eine Verbesserung kann erreicht werden, indem anstelle der gemessenen Werte deren Abweichungen von den langjährigen Monatsterminmitteln verwendet werden. Dadurch wird der Jahres- wie auch der mittlere Tagesgang der Temperatur ausgeschaltet, was eine Reduktion der Streuung um etwas mehr als 50 % und dadurch eine deutlich schärfere Trennung bewirkt. Auch wird die angestrebte Normalverteilung besser angenähert. Die Mittelwerte und Streuungen der Temperaturabweichungen lauten:

	Föhn (Gruppe A)		Nichtföhn (Gruppe B)		t-Wert	p
	Mittel	Streuung	Mittel	Streuung		
Temperaturabweichung von den Monatsterminmittelwerten (°C)	5.6	3.7	-1.2	4.2	23.2	<0.001

Der neuerrechnete t-Wert beträgt mehr als das Doppelte des von den effektiv gemessenen Temperaturen stammenden Betrages. Bei der Temperatur konnte also durch die Verwendung der Abweichungen von den Monatsterminmittelwerten anstelle der Terminbeobachtungen selbst ebenfalls eine merkliche Steigerung in der Trennung der beiden Gruppen erreicht werden.

Der Versuch, bei den Mittagstemperaturen den mittleren Anteil der Einstrahlung auszugleichen, führte zu keiner Verbesserung der Trennschärfe. Bei der Berechnung der monatlichen linearen Regressionsgleichungen erwies sich einzig die Abhängigkeit des Temperatursprungs Morgen-/Mittagstermin von der Bewölkung als signifikant. Für die Jahre 1965-67 schwankte der Korrelationskoeffizient zwischen 0.83 im September und 0.44 im Dezember (Jahresmittel 0.71). Durch Miteinbezug von Variablen früherer Termine oder anderer Stationen könnte die Korrelation etwas erhöht werden. Dies ist bei der uns auferlegten Beschränkung auf die Terminbeobachtungen der Teststation jedoch nicht möglich, sodass auf eine Korrektur der Einstrahlung verzichtet werden musste.

3.2.3. Relative Feuchtigkeit

Diese Variable wies bereits zu Beginn eine recht gute Trennung auf (Abb. 1). Dies liegt darin begründet, dass der Jahresgang nicht so bedeutend und der Tagesgang nur bei der Nichtföhngruppe ausgeprägt ist. Verwenden wir auch hier die Abweichungen von den Monatsterminmit-

telwerten, so erfolgt erwartungsgemäss eine verglichen mit der Temperatur weniger deutliche aber trotzdem noch wesentliche Verbesserung.
Die neuen Werte lauten:

	Föhn (Gruppe A)		Nichtföhn (Gruppe B)		t-Wert	p
	Mittel	Streuung	Mittel	Streuung		
Feuchtigkeitsabweichung von den Monatsterminmittelwerten (%)	- 25	10	+ 4	12	33.4	< 0.001

Auch bei der relativen Feuchtigkeit bewirkt das Ausschalten des Jahres- und Tagesganges eine bessere Angleichung an eine Normalverteilung (Abb. 3).

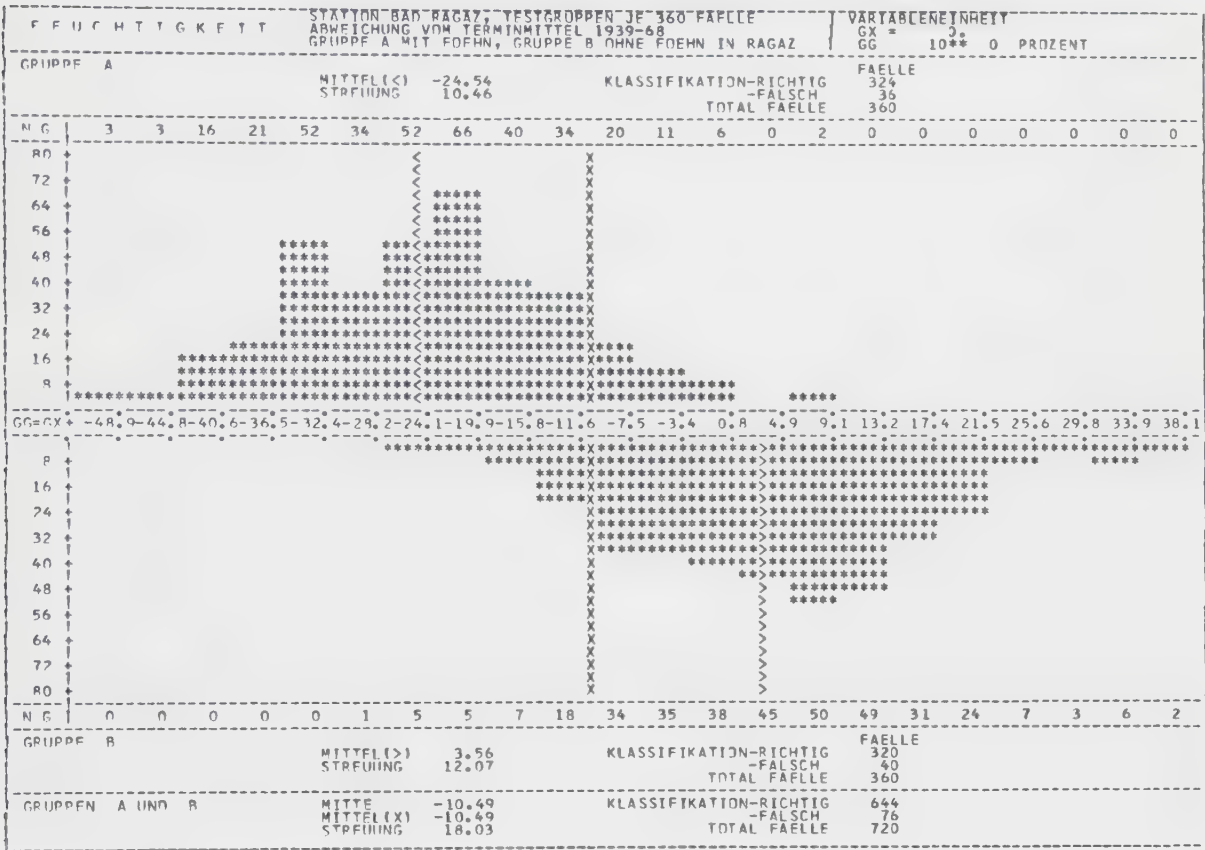


Abb. 3 Verteilungen der relativen Feuchtigkeitsabweichungen vom Terminmonatsmittel.
In beiden Jahrestestgruppen ist, verglichen mit den unveränderten Feuchtigkeitswerten (Abb. 1) eine schärfere Trennung und zudem eine bessere Annäherung an eine Normalverteilung zu erkennen.

Vergleich mit theoretischer Normalverteilung (Chi-Quadrat-Test bei möglichst günstiger Klassenzahl):
Gruppe A: 7 Klassen, Klassenbreite: 8.9 % p = 0.63
Gruppe B: 7 Klassen, Klassenbreite: 9.6 % p = 0.35
Beide Verteilungen weichen nicht signifikant von einer theoretischen Normalverteilung ab.

3.2.4. Luftdruck und Bewölkung

Beide Merkmale zeigen einen zu wenig ausgeprägten Tages- und Jahresgang, als dass durch dessen Ausschaltung eine wirkungsvolle Verbesserung der ohnehin bescheidenen Trennung zu erwarten wäre. Diese Grössen gehen daher unverändert in die Trennformel ein.

3.2.5. Auswahl der signifikanten Föhnmerkmale

Aus der teilweisen Umformung der 6 Ausgangsvariablen im Hinblick auf eine möglichst gute Trennung resultierten die folgenden 5 Merkmale (geordnet nach absteigendem t-Wert, d. h. nach abnehmender Trennschärfe):

a) Jahrestestgruppen (je 360 Fälle):

Variable	Föhn (Gruppe A)		Nichtföhn (Gruppe B)		t-Wert	p
	Mittel	Streuung	Mittel	Streuung		
Windmass	8.5	1.5	15.0	2.1	46.9	< 0.001
Feuchtigkeitsabweichung (%)	- 25	10	+ 4	12	33.4	< 0.001
Temperaturabweichung (°C)	5.6	3.7	- 1.2	4.2	23.2	< 0.001
Luftdruck (mm Hg)	714.4	6.8	717.7	5.2	7.4	< 0.001
Bewölkung (Zehntel)	5.2	3.8	6.6	4.0	4.8	< 0.001

b) Monatstestgruppen (je 30 Fälle)

FEBRUAR (als Beispiel eines Monats mit grosser Föhnhäufigkeit):

Variable	Föhn (Gruppe A)		Nichtföhn (Gruppe B)		t-Wert	p
	Mittel	Streuung	Mittel	Streuung		
Windmass	7.6	1.5	15.2	2.6	13.9	< 0.001
Feuchtigkeitsabweichung (%)	- 33	9	+ 6	11	14.5	< 0.001
Temperaturabweichung (°C)	7.6	3.4	- 0.9	5.5	7.2	< 0.001
Luftdruck (mm Hg)	714.0	4.8	718.5	8.2	2.6	< 0.01
Bewölkung (Zehntel)	5.9	4.2	6.7	4.1	0.8	

JULI (als Beispiel eines Monats mit niedriger Föhnhäufigkeit):

Variable	Föhn (Gruppe A)		Nichtföhn (Gruppe B)		t-Wert	p
	Mittel	Streuung	Mittel	Streuung		
Windmass	9.5	1.4	15.0	2.3	11.2	< 0.001
Feuchtigkeitsabweichung (%)	- 22	7	- 3	11	7.8	< 0.001
Temperaturabweichung (°C)	4.9	2.9	- 0.9	2.8	7.9	< 0.001
Luftdruck (mm Hg)	717.8	3.3	718.7	3.1	1.2	
Bewölkung (Zehntel)	4.9	3.4	5.8	4.0	1.0	

Im Sommer ist ein allgemeiner Rückgang der Trennschärfe festzustellen; Luftdruck und Bewölkung trennen im Juli nicht einmal mehr auf dem 5 % Niveau signifikant. Dieses Näherrücken der Mittelwerte war zu erwarten, sind doch in der warmen Jahreszeit die Föhnlagen neben der geringeren Häufigkeit auch nur wenig ausgeprägt.

Eine genauere Beurteilung der Bedeutung der einzelnen Variablen für die Trennung der beiden Gruppen erlaubt ein von LINDER²⁰ vorgeschlagenes Verfahren (vgl. Zusammenfassung in Teil I, Abschnitt 3.4). Dazu müssen für die verschiedenen Variablenkombinationen die Trennfunktionen und die zugehörigen Gruppenmittelwertsabstände der Rechenmasse bestimmt werden. In unserem Falle wurde mit den beiden Variablen Windmass und Feuchtigkeitsabweichung begonnen, da diese aufgrund der hohen t-Werte mit Sicherheit einen wesentlichen Beitrag an die Trennung leisten. Schrittweise wurden die übrigen drei Variablen in der Reihenfolge Temperaturabweichung, Luftdruck und Bewölkung miteinbezogen. Aus den Koeffizienten b_1 der vier Trennformeln und aus den Gruppenmittelwertsabständen der entsprechenden Variablen wurden nach Formel (9) die zu jeder Trennfunktion gehörenden Mittelwertsabstände d_X der Rechenmasse berechnet. Ist nun der Abstand der Rechenmasse bei Verwendung einer weiteren Variablen grösser als jener für die ursprüngliche Variablenzahl, und weicht diese Zunahme signifikant von Null ab (Nullhypothese), so bewirkt diese zusätzliche Variable eine merkliche Verbesserung der Trennung. Für die Jahrestestgruppen sowie für die beiden Monate Februar und Juli wurden die errechneten Werte in Tabelle 1 zusammengestellt.

Da beim Anwendungstest für jeden einzelnen zu prüfenden Termin nach Formel (7) die Wahrscheinlichkeit der Gruppenzugehörigkeit berechnet wird, kann für die einzelnen Testgruppen und die vier verschiedenen Trennformeln die mittlere Wahrscheinlichkeit aller der betreffenden Gruppe richtig zugeteilten Fälle ermittelt werden (Tabelle 1 rechts). Unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Zahl der pro Gruppe falsch klassifizierten Fälle bilden diese mittleren Wahrscheinlichkeiten ein weiteres Kriterium für die Beurteilung, ob sich der Miteinbezug einer weiteren Variablen lohnt.

Aufgrund der oben beschriebenen Kriterien erfolgte der Entschluss, die Variablen 4 und 5 (Luftdruck und Bewölkung) fallen zu lassen. Während bei der Bewölkung eindeutige Verhältnisse vorliegen, führten beim Luftdruck folgende Überlegungen zu diesem Entscheid: Die starke Signifikanz der Gruppendistanzzunahme bei Miteinbezug des Luftdruckes in den Jahrestestgruppen ist bei den Monaten Februar und Juli auch unter Berücksichtigung der allgemeinen Abnahme der F-Werte infolge kleiner Gruppengrösse nicht mehr vorhanden. Ausserdem bleibt die Zahl der drei Fehlklassifikationen unverändert. Und endlich wurde auch der Tatsache Rechnung getragen, dass für die übliche Föhndefinition der Absolutbetrag des Luftdruckes am Beobachtungsort nicht verwendet wird.

Die weiteren Untersuchungen zur Bestimmung einer möglichst leistungsfähigen Trennfunktion beschränken sich daher auf die ersten drei Variablen Windmass, Feuchtigkeitsabweichung und Temperaturabweichung, für welche ein statistisch signifikanter Einfluss auf die Trennung nachweisbar ist.

Tabelle 1 Signifikanzwerte des Gruppendifferenzwachses bei Miteinbezug zusätzlicher Variablen und Beurteilung der Trennschärfe mit Hilfe der Anzahl falsch klassifizierter Fälle und der mittleren Wahrscheinlichkeit der Gruppenzugehörigkeit.

Untersuchte Variablen: 1 Windmass 3 Temperaturabweichung 5 Bewölkung
2 Feuchtigkeitsabweichung 4 Luftdruck

miteinbezogene Variablen	d _X Gruppendifferenz (Abstand der Gruppenmittel der Rechenmasse)	F-Wert des Gruppendifferenzwachses bei Miteinbezug einer weiteren Variablen	Signifikanz p	Anzahl falsch klassifizierter Fälle Föhn Nichtföhn	mittlere Wahrscheinlichkeit der Gruppenzugehörigkeit der richtig klassifizierten Fälle Föhn Nichtföhn
J A H R (je 360 Fälle pro Gruppe)					
1, 2	19.8			-	0.99158
1, 2, 3	20.5	22.9	<0.001	-	0.98962
1, 2, 3, 4	21.0	19.0	<0.001	1	0.99248
1, 2, 3, 4, 5	21.1	4.5	<0.01	2	0.99274
				1	0.99275
				2	0.99109
F E B R U A R (je 30 Fälle pro Gruppe)					
1, 2	25.4			-	0.99426
1, 2, 3	29.3	8.5	<0.01	-	0.99941
1, 2, 3, 4	31.0	2.8	<0.05	-	0.99951
1, 2, 3, 4, 5	31.0	0.1		-	0.99949
				1	0.99962
				-	0.99447
				-	0.98510
				-	0.98453
J U L I (je 30 Fälle pro Gruppe)					
1, 2	16.8			-	0.98893
1, 2, 3	18.3	5.0	<0.01	-	0.99101
1, 2, 3, 4	19.2	2.7	<0.05	-	0.97925
1, 2, 3, 4, 5	19.6	1.0		1	0.99433
				-	0.97040
				-	0.98479
				-	0.99294
				-	0.99541

4. Modifikation der Variablen im Hinblick auf die Bestimmung einer für das ganze Jahr gültigen Trennfunktion

4.1. Tages- und Jahresgang der drei Föhnkriterien (Temperatur- und Feuchtigkeitsabweichung vom langjährigen Mittelwert und Windmass)

Die Bestimmung von monatlichen Trennfunktionen trägt der Tatsache Rechnung, dass die verwendeten Föhnmerkmale einen deutlichen Jahresgang aufweisen. Um diese jahreszeitlichen Aenderungen möglichst zuverlässig abschätzen zu können, wurden mit einer provisorischen Trennformel die Föhntermine der Jahre 1949-58 und 1964-68 (insgesamt 15 Jahre) bestimmt. Die einzelnen Beobachtungen wurden überprüft und die Zweifelsfälle ausgeschlossen. Aus den übrigen Föhnterminen liessen sich die 15-jährigen monatlichen Terminmittel der Föhnmerkmale für Bad Ragaz berechnen. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2 Terminmittelwerte der drei ausgewählten Föhnmerkmale für die Station Bad Ragaz und die Jahre 1949-58 und 1964-68.

Entsprechend der Föhnhäufigkeit stammen die obigen Mittel im Sommer von einer kleineren Zahl (Minimum: 10 Mittagstermine im Juli), im Frühling von einer grösseren Zahl (Maximum: 78 Abendtermine im Mai) von Einzelbeobachtungen.

Monat	Durchschnittliche Abweichungen der Föhntermin- ne von den Terminmittelwerten 1939 - 1968								Windmass			
	Temperatur Grad Celsius				Relative Feuchtigkeit Prozent							
	0730	1330	2130	Mittel	0730	1330	2130	Mittel	0730	1330	2130	Mittel
Jan.	7.0	6.7	7.3	7.0	- 31	- 27	- 34	- 31	7.5	8.4	7.2	7.7
Feb.	7.4	7.7	7.5	7.5	- 31	- 22	- 29	- 27	6.9	8.0	7.5	7.5
März	5.4	5.4	5.2	5.3	- 28	- 19	- 26	- 24	7.8	8.5	8.6	8.3
April	3.7	5.4	4.4	4.5	- 22	- 17	- 20	- 20	8.6	9.1	9.8	9.1
Mai	4.3	5.8	5.2	5.1	- 21	- 17	- 23	- 20	9.3	9.5	9.8	9.5
Juni	4.0	4.9	4.7	4.5	- 23	- 19	- 25	- 22	8.8	9.5	9.5	9.3
Juli	4.9	7.5	5.8	6.1	- 22	- 20	- 28	- 23	8.7	9.8	9.3	9.3
Aug.	5.7	7.4	5.4	6.1	- 27	- 22	- 33	- 27	7.9	9.9	9.1	9.0
Sept.	4.6	4.5	5.2	4.8	- 27	- 18	- 32	- 26	8.5	9.4	8.0	8.6
Okt.	6.7	6.0	6.5	6.4	- 33	- 18	- 33	- 28	8.1	9.0	7.9	8.4
Nov.	7.3	6.3	7.0	6.8	- 33	- 25	- 33	- 30	6.9	7.6	7.1	7.2
Dez.	7.2	6.8	6.6	6.9	- 32	- 30	- 31	- 31	7.5	8.0	7.3	7.6

Die Abb. 4 a-c veranschaulichen die drei Jahresgänge und zeigen im weiteren, dass in verschiedenen Monaten die Mittel der Mittagstermine wesentlich vom Morgen- und Abendtermin abweichen; es ist also häufig auch ein Tagesgang vorhanden.

So sind die Temperaturabweichungen bei Föhn am Mittag vom Februar bis August grösser, in den übrigen Monaten meist kleiner als diejenigen der Morgen- und Abendtermine. Im Gegensatz dazu liegen die Werte bei der relativen Feuchtigkeit näher beisammen; hier fällt der Unterschied im Oktober mit einer mittleren Abweichung von nur 18 % am Mittag gegenüber 33 % am Morgen und Abend am grössten aus. Das Windmass weist mit Ausnahme der Monate

März bis Juni (höchste Werte am Abend) die grössten Beträge am Mittag auf. Dies ist eine Folge der Tatsache, dass die in Bad Ragaz beobachteten Windstärken bei Föhn am Mittag in diesen Monaten etwas geringer sind als zu den Morgen- und Abendterminen.

Die jährliche Schwankungsbreite der Abweichungen bei Föhn ist sowohl bei der Temperatur mit 3.7 Grad als auch bei der Feuchtigkeit mit 17 % beträchtlich. Im Gegensatz dazu fällt sie bei den Nichtföhnfällen bei beiden Merkmalen nicht wesentlich ins Gewicht, da die mittlere

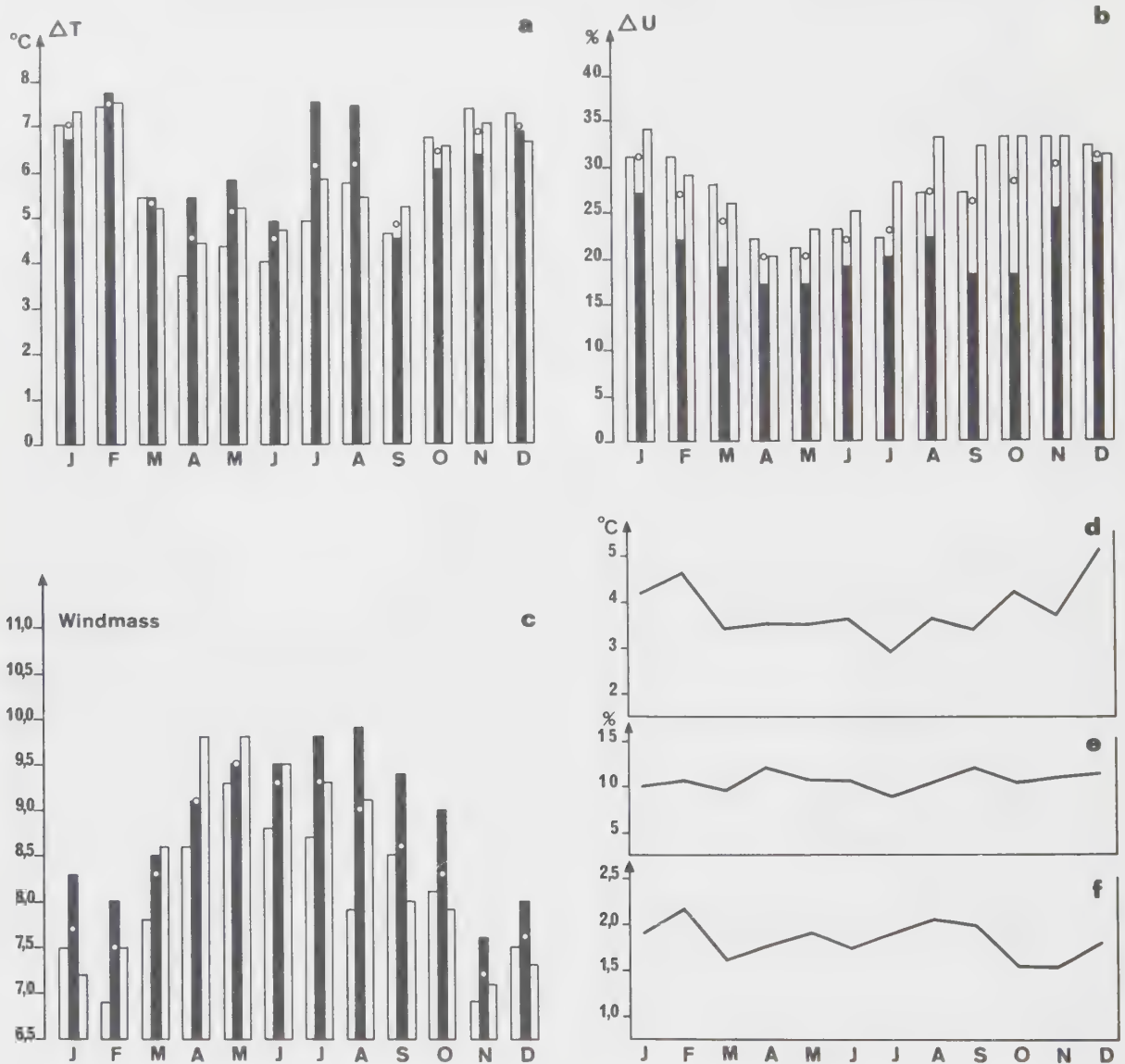


Abb. 4 Mittlerer Tages- und Jahresgang der für die Bestimmung der Trennfunktion beigezogenen Föhnmerkmale der Terminbeobachtungen mit Föhn aus den Jahren 1949-58 und 1964-68 für die Station Bad Ragaz (links 7 Uhr, Mitte (schwarz) 13 Uhr, rechts 21 Uhr Termin; weisser Punkt = Tagesmittel):

a Temperaturabweichung vom Terminmittel 1939-68

b Abweichung der rel. Feuchtigkeit vom Terminmittel 1939-68

c Windmass

Jahresgang der Streuungen der drei Föhnmerkmale (monatliche Mittel der beiden Testgruppen):

d Temperaturabweichung

e Feuchtigkeitsabweichung

f Windmass

Föhnhäufigkeit mit maximal 5 Abendterminen pro Jahr im Mai und minimal 1 Mittags- und Abendtermin im Juli zu gering ist, um die langjährigen Terminmittel stark zu beeinflussen. Die Abstände der Mittelwerte der beiden Gruppen Föhn und Nichtföhn zeigen daher einen Tages- und Jahresgang, welcher im wesentlichen auf die oben besprochenen Schwankungen der Föhnfälle zurückzuführen ist.

Einen Jahresgang zeigen aber teilweise auch die Streuungen (vgl. Abb. 4 d-f). Während die Temperaturabweichungen im allgemeinen im Winter stärker streuen als in den Sommermonaten, zeigt der Streuungsverlauf bei der Feuchtigkeit und beim Windmass keine starke jahreszeitliche Beeinflussung.

Es gilt also in der Folge zu berücksichtigen, dass beide für die Trennfunktion massgebenden Ausgangsgrößen (Mittelwertsabstand und Streuung der Merkmale) jährlichen Schwankungen unterworfen sind. Um die zwölf monatlichen Trennfunktionen durch eine einzige für das ganze Jahr gültige ersetzen zu können, sollte daher der Jahresgang der Föhnmerkmale soweit möglich ausgeschaltet werden.

4. 2. Reduktion des Tages- und Jahresganges

Im Teil I, Abschnitt 3.1 wurde dargelegt, dass für die Bestimmung der Koeffizienten b_i einer Trennfunktion an erster Stelle die Verhältnisse der Mittelwertsabstände der Merkmale zu ihren gemeinsamen Streuungen von Bedeutung sind. Es besteht nun die Möglichkeit, die Lage und den Betrag der Gruppenmittelwertsabstände der verschiedenen Monate und Termine auf

Tabelle 3 Abstände der Gruppenmittelwerte der Föhn- und Nichtföhntermine für die drei ausgewählten Föhnmerkmale (Temperatur- und Feuchtigkeitsabweichung vom Terminmittel 1939-68 sowie Windmass) in Bad Ragaz.
Der Jahresgang wurde durch Bildung übergreifender Mittel etwas geglättet (siehe Formel (4. 2)). Die tabellierten Werte dienen als Ausgangsparameter für die Transformation auf die einheitlichen Abstände d_{trans} .

Monat	Gruppenmittelwertsabstände der Föhnmerkmale								
	Temperatur Grad Celsius			Feuchtigkeit Prozent			Windmass		
	0730	1330	2130	0730	1330	2130	0730	1330	2130
Januar	7.7	7.7	7.9	34	29	36	7.4	6.6	7.5
Februar	7.5	7.7	7.7	34	26	33	7.7	6.7	7.3
März	6.1	6.8	6.4	30	22	29	7.3	6.5	6.4
April	4.8	6.3	5.6	26	20	25	6.7	6.2	5.7
Mai	4.8	6.2	5.6	25	20	26	6.0	5.8	5.4
Juni	4.8	6.2	5.6	25	20	27	5.7	5.6	5.6
Juli	5.1	7.1	5.7	25	21	29	6.0	5.2	5.6
August	5.6	7.0	5.7	27	21	33	6.2	5.0	5.9
September	5.7	5.9	6.0	31	20	35	6.5	5.5	6.7
Oktober	6.8	6.2	6.8	34	22	36	7.1	6.3	7.2
November	7.7	7.0	7.4	36	27	36	7.3	6.6	7.2
Dezember	7.8	7.4	7.6	36	31	36	7.2	6.5	7.2
d_{trans}	7.0			28			7.0		

Tabelle 4 Geglättete Mittellagen (Durchschnitt der beiden Gruppenmittel) der Föhn- und Nichtföhntermine für die drei ausgewählten Föhnmerkmale in Bad Ragaz.
Vergleiche im übrigen die Anmerkungen zu Tabelle 3.

Monat	Geglättete Mittellagen (Durchschnitt der beiden Gruppenmittel)								
	Temperatur Grad Celsius			Feuchtigkeit Prozent			Windmass		
	0730	1330	2130	0730	1330	2130	0730	1330	2130
Januar	3.4	3.3	3.3	- 15	- 12	- 15	11.3	11.6	11.1
Februar	2.9	2.8	2.9	- 13	- 10	- 13	10.9	11.4	11.4
März	2.4	2.7	2.5	- 12	- 8	- 11	11.4	11.8	12.1
April	1.9	2.3	2.2	- 10	- 7	- 10	11.8	12.1	12.5
Mai	1.7	2.3	1.9	- 9	- 8	- 9	12.0	12.3	12.4
Juni	2.1	2.8	2.5	- 10	- 9	- 12	11.9	12.4	12.2
Juli	2.3	3.3	2.8	- 12	- 10	- 14	11.7	12.4	12.2
August	2.5	3.2	2.7	- 12	- 10	- 14	11.6	12.4	12.0
September	2.6	2.7	2.6	- 14	- 9	- 15	11.5	12.1	11.4
Oktober	3.0	2.7	2.9	- 15	- 10	- 15	11.7	12.0	11.5
November	3.1	2.8	3.0	- 14	- 10	- 14	10.8	11.2	11.0
Dezember	3.1	2.9	3.1	- 15	- 12	- 15	10.9	11.2	10.9
M _{trans}	2.0			- 10			12.0		

einen gemeinsamen Wert zu transformieren. Geschieht diese Transformation so, dass die Gruppenstreuungen im gleichen Verhältnis wie die Mittelwertsabstände ändern, so bleibt für die Beobachtungen desselben Termins innerhalb eines Monats die Trennung dieselbe; d. h. das Datenmaterial jenes Termins erfährt im Hinblick auf eine Trennung keine Aenderung. Die folgende Formel erlaubt eine entsprechende Transformation der Ausgangsvariablen:

$$x_{i, \text{trans}} = \frac{d_{i, \text{trans}}}{d_i} (x_i - M_i) + M_{i, \text{trans}} \tag{4.1}$$

- wo: $x_{i, \text{trans}}$ = Merkmalswert nach der Transformation (Variable i)
- x_i = Merkmalswert vor der Transformation (Variable i)
- $d_{i, \text{trans}}$ = gewünschter Abstand der Gruppenmittel nach der Transformation (Variable i)
- $M_{i, \text{trans}}$ = arithmetisches Mittel der Gruppenmittel (= Mittellage) nach der Transformation (Variable i)
- d_i = effektiver Abstand der Gruppenmittel vor der Transformation (Variable i)
- M_i = arithmetisches Mittel der Gruppenmittel (= Mittellage) vor der Transformation (Variable i)

Auf diese Art werden die Merkmalsmittel der einzelnen Termine jedes Monats auf je einen für die beiden Gruppen Föhn und Nichtföhn über das ganze Jahr gleichen Wert verschoben, sodass die Mittelwertsabstände der drei Merkmale theoretisch im Jahresablauf keine Änderung mehr aufweisen.

Für die Durchführung der Transformation benötigt man für die drei Föhnmerkmale die Mittelwertsabstände d_i und die Mittellagen M_i (arithmetisches Mittel der Gruppenmittel) aller Termine der einzelnen Monate. Bei ihrer Berechnung wurden die geringen jährlichen Schwankungen der Gruppenmittel der Nichtföhntermine mitberücksichtigt. Durch die Bildung übergreifender Mittel nach der Formel

$$d'_{i, \text{Feb}} = \frac{d_{i, \text{Jan}} + 2 \cdot d_{i, \text{Feb}} + d_{i, \text{März}}}{4} \quad (4.2)$$

erfolgte eine Glättung des Jahresverlaufs, woraus die in Tabelle 3 und 4 aufgeführten Werte resultierten. Der deutliche Jahresgang dieser Ausgangsparameter der Transformation wird in den Abb. 5 a-c, getrennt nach Morgen-, Mittag- und Abendbeobachtungen, veranschaulicht.

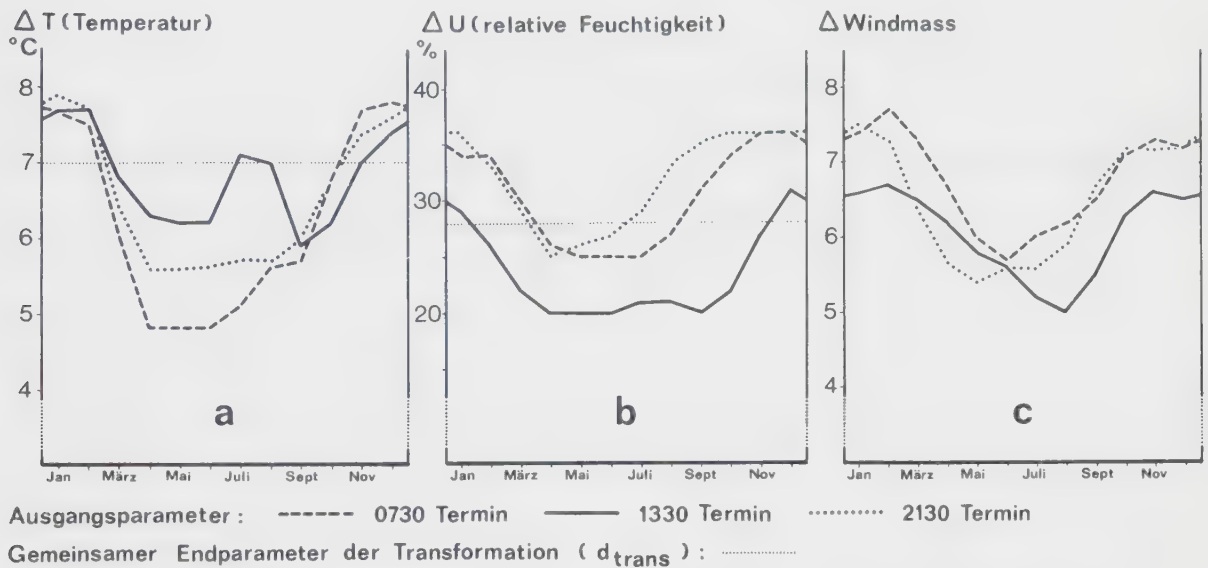


Abb. 5 Jahresgang der geglätteten Terminmittelwertsabstände der Föhnmerkmale für die beiden Gruppen Föhn und Nichtföhn in Bad Ragaz.

a Temperatur

b relative Feuchtigkeit

c Windmass

Die gemeinsamen Endparameter $d_{i, \text{trans}}$ und $M_{i, \text{trans}}$ wurden für die einzelnen Variablen i den mit den Föhnhäufigkeiten gewichteten Jahresmitteln der monatlichen Ausgangswerte angeglichen. Sie sind ebenfalls in Tabelle 3 und 4 aufgeführt.

Auch nach der Transformation sind die angenäherten Normalverteilungen der drei Föhnmerkmale gesichert (Abb. 6). Damit sind die Beobachtungen der Jahrestestgruppen in einer Form, welche die Bestimmung einer gemeinsamen Trennformel erlaubt.

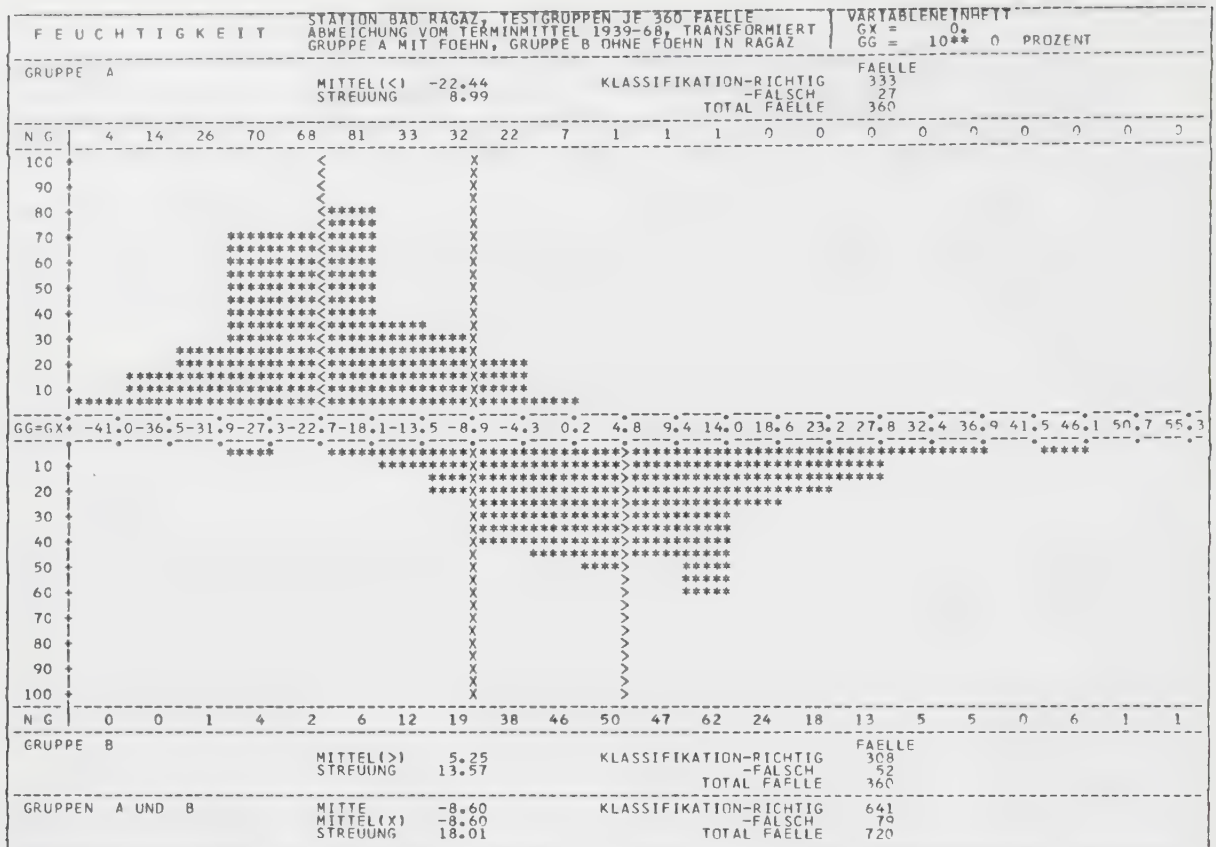


Abb. 6 Verteilungen der transformierten Feuchtigkeitsabweichungen vom langjährigen Terminmittel für die beiden vollständigen Jahrestestgruppen (je 360 Fälle) Föhn und Nichtföhn in Bad Ragaz.

Vergleich mit theoretischer Normalverteilung (Chi-Quadrat-Test bei möglichst günstiger Klassenzahl):

Gruppe A: 6 Klassen, Klassenbreite: 7.6 % p = 0.34

Gruppe B: 9 Klassen, Klassenbreite: 8.7 % p = 0.10

Beide Verteilungen weichen nicht signifikant von einer theoretischen Normalverteilung ab.

5. Bestimmung der jährlichen Trennformel

5.1. Grössen und Zusammensetzung der Testgruppen

Das aufbereitete Jahrestestgruppenpaar umfasst je 360 Fälle, wobei jeder Monat mit 30 Fällen gleich stark vertreten ist. Da jedoch die mittlere Föhnhäufigkeit einen starken Jahresgang aufweist (Tabelle 5), ist es sinnvoll, die Anzahl Beobachtungen der einzelnen Monate proportional zur Föhnhäufigkeit zu wählen. Auf diese Weise erhalten die Streuungen der Monate mit grösserer Föhnhäufigkeit ein stärkeres Gewicht, womit die Tatsache berücksichtigt wird, dass praktisch die gesamten jahres- und tageszeitlichen Schwankungen der Föhnmerkmale in bezug auf eine Trennung nach der Transformation in den nun noch verstärkten Streuungsunterschieden enthalten sind. Da die Monate mit grösserer Föhnhäufigkeit im allgemeinen bessere Trenneigenschaften (d. h. nach der Transformation die relativ kleineren Streuungen) aufweisen, wird so die Güte der Trennformel erhöht.

Ein weiteres Problem bildet das Verhältnis der beiden Gruppengrößen, kommen doch in Bad Ragaz die Nichtföhnfälle ungefähr zehnmal häufiger vor als die Föhnfälle. Die letztere einheitliche Gruppe weist aber eine kleinere Streuung auf als die heterogen zusammengesetzte Nichtföhngruppe. Wird nun die Nichtföhngruppe grösser gewählt als die Föhngruppe, so erhöht sich die Gesamtstreuung, was seinerseits eine Verschlechterung der Trennschärfe bewirkt. Wird umgekehrt die Föhngruppe vergrößert, wird dadurch die Trennung verbessert, was jedoch mit einer Entfernung vom tatsächlichen Grössenverhältnis der beiden Gruppen erkauft werden muss.

Unter Berücksichtigung des auf die Praxis ausgerichteten Zieles einer möglichst guten Trennung und um anderseits eine zu starke Entfernung von den tatsächlichen Grössenverhältnissen zu vermeiden, wählte ich als Kompromisslösung gleich grosse Gruppen. Da von den ursprünglichen Testgruppen (je 360 Fälle) für den Monat mit maximaler Föhnhäufigkeit höchstens 30 Fälle zur Verfügung standen, ergab sich folgende Zusammensetzung der neuen noch genügend grossen Jahrestestgruppen:

Tabelle 5 Zusammensetzung der endgültigen Jahrestestgruppen aufgrund der aus den 15 Jahren 1949-58 und 1964-68 berechneten mittleren Föhnhäufigkeiten von Bad Ragaz.

Monat	mittlere Föhnhäufigkeit (Mittel aus 15 Jahren) Anzahl Termine				Zusammensetzung der Jahrestestgruppen Anzahl Fälle			
	0730	1330	2130	Total	0730	1330	2130	Total
Januar	2.0	2.4	2.7	7.1	4	5	5	14
Februar	3.4	4.1	3.7	11.2	7	8	7	22
März	3.9	4.3	4.4	12.6	8	9	9	26
April	4.2	4.4	4.3	12.9	8	9	9	26
Mai	4.8	4.5	5.0	14.3	10	9	10	29
Juni	2.5	2.1	1.9	6.5	5	4	4	13
Juli	1.3	0.7	0.7	2.7	3	1	1	5
August	1.5	1.3	1.3	4.1	3	3	3	9
September	2.1	1.9	2.2	6.2	4	4	4	12
Oktober	1.9	1.9	2.4	6.2	4	4	5	13
November	3.2	3.9	3.2	10.3	6	8	6	20
Dezember	3.3	3.5	3.1	9.9	7	7	6	20
Jahr	34.1	35.0	34.9	104.0	69	71	69	209

5.2. Jahrestrennformel

Mit dem je 209 Fälle umfassenden Testgruppenpaar der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Zusammensetzung wurden nun nach erfolgter Transformation der Beobachtungswerte die Parameter der Trennformeln für die zwei Gruppen A (Föhntermine) und B (Nichtföhntermine) berechnet.

TEMPERATUR											STATION BAD RAGAZ, TESTGRUPPEN JE 205 FÄELE ABWEICHUNG VOM TERMINMITTEL 1939-68, TRANSFORMIERT GRUPPE A MIT FOEHN, GRUPPE B OHNE FOEHN IN BAD RAGAZ											VARTABELNENREIHE GX = 0 GG = 10** 0 GRAD CELSIUS																					
GRUPPE A											MITTEL(<) STREUUNG 4.80 3.76											KLASSIFIKATION-RICHTIG -FALSCH TOTAL FÄELLE											FÄELLE 167 42 209										
NG											0 0 0 0 0 0 0 0 3 1 5 8 15 24 22 33 38 30 18 9 1 2																																
60																						X											X										
54																						X											X										
48																						X											X										
42																						X											X										
36																						X											X										
30																						X											X										
24																						X											X										
18																						X											X										
12																						X											X										
6																						X											X										
GG=GX											-17.6-16.1-14.5-13.0-11.4-9.9-8.4-6.8-5.3-3.7-2.2-0.6 0.9 2.4 4.0 5.5 7.1 8.6 10.1 11.7 13.2 14.8																																
6																						X											X										
12																						X											X										
18																						X											X										
24																						X											X										
30																						X											X										
36																						X											X										
42																						X											X										
48																						X											X										
54																						X											X										
60																						X											X										
NG											2 1 1 1 2 6 9 16 17 28 30 42 23 8 13 2 1 1 0 0 0																																
GRUPPE B											MITTEL(>) STREUUNG -2.07 4.54											KLASSIFIKATION-RICHTIG -FALSCH TOTAL FÄELLE											FÄELLE 172 37 209										
GRUPPEN A UND B											MITTE MITTEL(X) STREUUNG 1.36 1.36 5.40											KLASSIFIKATION-RICHTIG -FALSCH TOTAL FÄELLE											FÄELLE 339 79 418										

FEUCHTIGKEIT														STATION BAD RAGAZ, TESTGRUPPEN JE 209 FÄLLE ABWEICHUNG VOM TERMINMITTEL 1939-68, TRANSFORMIERT GRUPPE A MIT FÖHN, GRUPPE B OHNE FÖHN IN RAGAZ														VARIABLENHEIT GX = 0 GG = 10** 0 PROZENT																																									
GRUPPE A														MITTEL(<) -22.74 STREUUNG 8.82														KLASSIFIKATION-RICHTIG -FALSCH TOTAL FÄLLE														FÄLLE 192 17 209																											
N G														4 9 22 37 33 46 20 19 10 5 2 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0																																																							
60														<														X																																									
54														<														X																																									
48														b														X																																									
42														<*****														X																																									
36														*****														X																																									
30														*****														X																																									
24														*****														X																																									
18														*****														X																																									
12														*****														X																																									
6														*****														X																																									
GG=GX														-39.2-35.2-31.1-27.0-22.9-18.8-14.7-10.6-6.5-2.4 1.7 5.7 9.8 13.9 18.0 22.1 26.2 30.3 34.4 38.5 42.6 46.6																																																							
6														*****														*****														*****														*****													
12														*****														*****														*****														*****													
18														*****														*****														*****														*****													
24														*****														*****														*****														*****													
30														*****														*****														*****														*****													
36														*****														*****														*****														*****													
42														*****														*****														*****														*****													
48														*****														*****														*****														*****													
54														*****														*****														*****														*****													
60														*****														*****														*****														*****													
N G														0 0 1 3 2 1 9 11 16 19 23 24 29 31 13 8 8 4 1 2 1 3																																																							
GRUPPE B														MITTEL(>) 4.42 STREUUNG 13.60														KLASSIFIKATION-RICHTIG -FALSCH TOTAL FÄLLE														FÄLLE 180 29 209																											
GRUPPEN A UND B														MITTE MITTEL(X) STREUUNG -9.16 -9.16 17.77														KLASSIFIKATION-RICHTIG -FALSCH TOTAL FÄLLE 372 46 418																																									

Die Trennformeln lauten:

$$M^a = 0.08 x_1 - 0.14 x_2 + 2.14 x_3 - 10.6 \quad (5.1 a)$$

$$M^b = -0.13 x_1 + 0.05 x_2 + 4.12 x_3 - 32.1 \quad (5.1 b)$$

wo: x_1 = Temperaturabweichung vom Terminmittel,
transformiert

x_2 = Feuchtigkeitsabweichung vom Terminmittel,
transformiert

x_3 = Windmass, transformiert

$M^a > M^b$: Beobachtungstermin ist der Gruppe
Föhn zuzuordnen

$M^b > M^a$: Beobachtungstermin ist der Gruppe
Nichtföhn zuzuordnen

Aus den Formeln (5.1) lässt sich die gemeinsame Trennformel und der Grenzwert X^* der Rechenmasse bestimmen (vgl. Teil I, Abschnitt 3.1.2):

$$X = 0.21 x_1 - 0.19 x_2 - 1.98 x_3$$

$$X^* = -21.5$$

oder:

$$X' = 0.21 x_1 - 0.19 x_2 - 1.98 x_3 + 21.5 \quad (5.2)$$

dann folgt:

$$X > -21.5 \quad \text{oder} \quad X' > 0: \text{ Zuordnung zur Föhngruppe}$$

$$X < -21.5 \quad \text{oder} \quad X' < 0: \text{ Zuordnung zur Nichtföhngruppe}$$

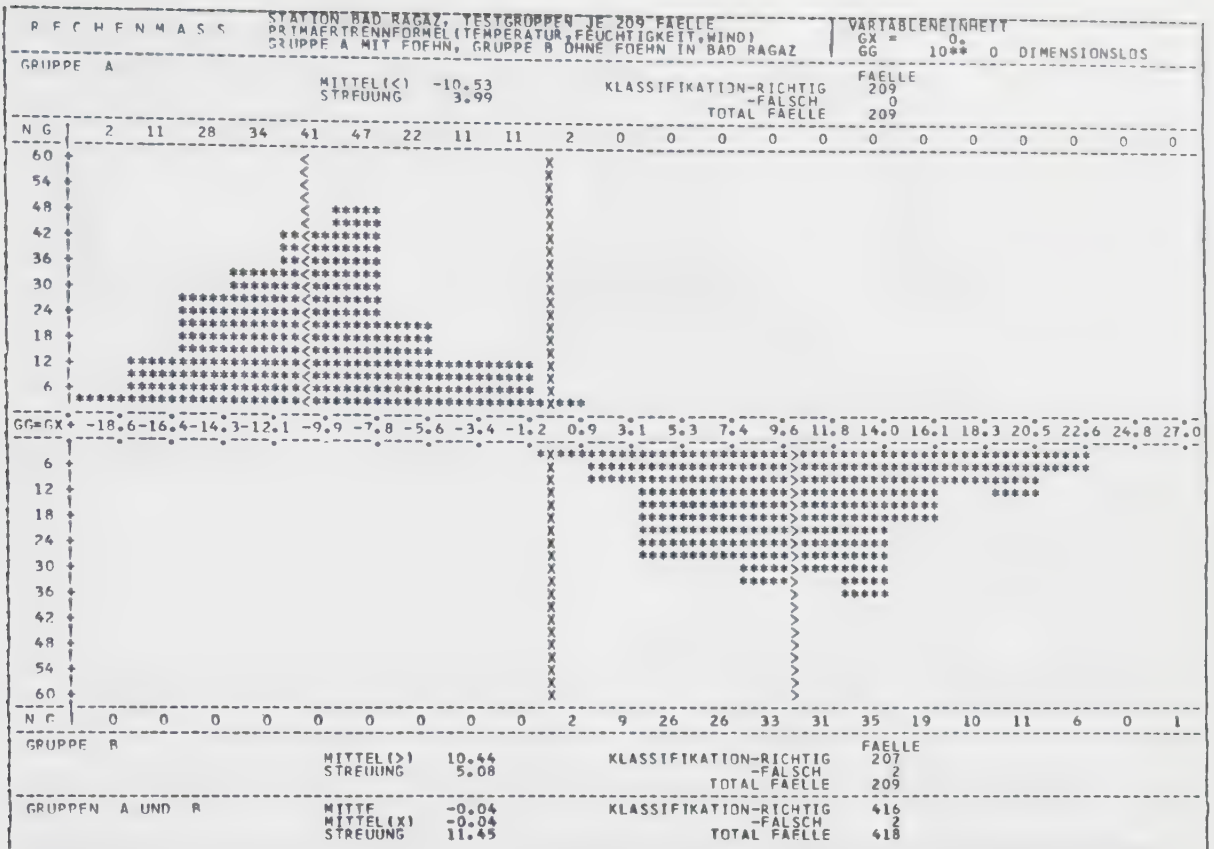


Abb. 8 Verteilungen der Rechenmasse der beiden Testgruppen Föhn und Nichtföhn, welche mit Formel (5.2) berechnet wurden.
Von den 418 untersuchten Fällen werden nur noch zwei falsch zugeordnet.

Die Abb. 7 a-c zeigen die Verteilungen der einzelnen Föhnmerkmale beider Testgruppen nach der Transformation. Zugleich ist daraus ersichtlich, wie gut die einzelnen Variablen die beiden Gruppen zu trennen vermögen:

Anzahl falsch
klassierter Termine
(total 418 untersuchte Fälle)

Variable 1: Temperaturabweichung	79
Variable 2: Feuchtigkeitsabweichung	46
Variable 3: Windmass	12

Die aus den drei Merkmalen kombinierten Rechenmasse X sind ebenfalls in beiden Gruppen näherungsweise normal verteilt (Abb. 8) und von den total 418 Testfällen werden nur noch zwei Beobachtungen falsch zugeordnet.

Dieses gute Ergebnis liegt darin begründet, dass bei der Auswahl der Termine für die Testgruppen allfällige Zweifelsfälle ausgeschlossen wurden. Diese Zweifelsfälle, deren Existenz auf die fehlende allgemein anerkannte Föhndefinition zurückzuführen ist, erschweren im folgenden auch die Beurteilung der mit den entwickelten Trennformeln zu erwartenden Erfolgsraten. Vorläufig sei jedoch nur darauf hingewiesen, dass die Zahl der Fehlklassifikationen ansteigen wird, sobald auch die Zweifelsfälle mitgetestet werden.

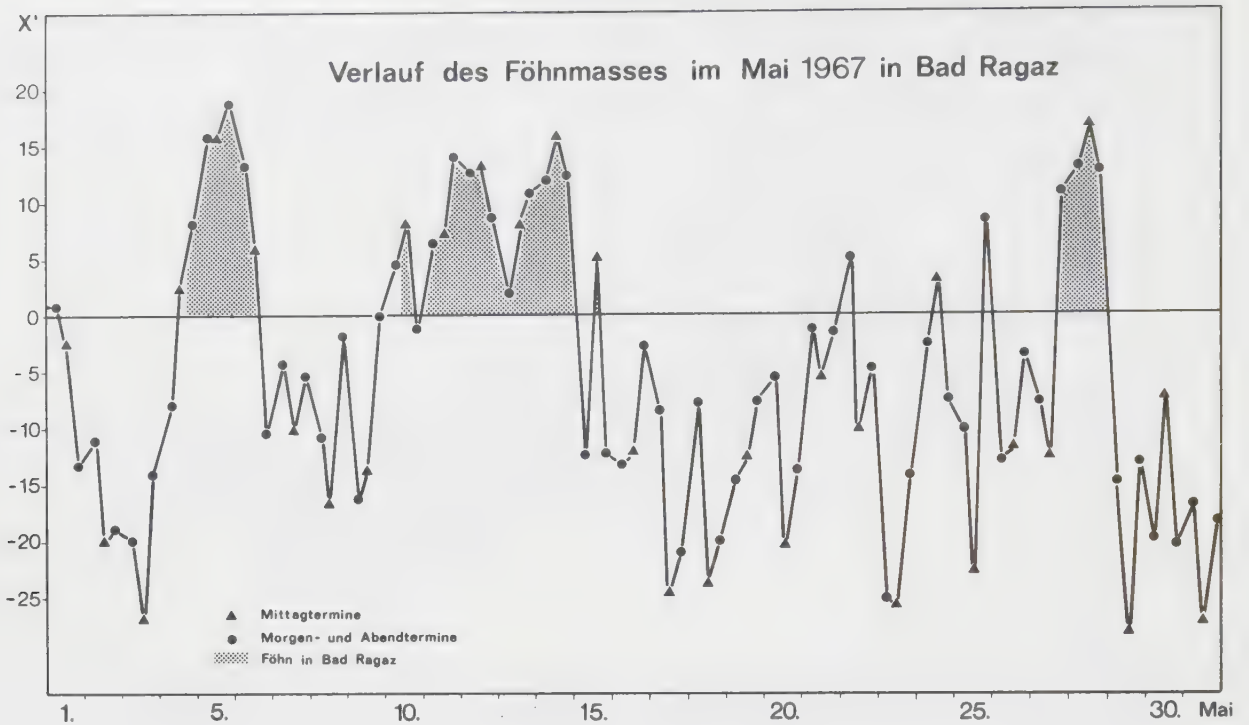


Abb. 9 Verlauf des Föhnmasses X' (vgl. Formel (5.2)). Dank seiner guten Trenneigenschaft hat das Windmass ein starkes Gewicht bei der Bestimmung dieses Föhnmasses. Windstärke- und Windrichtungsschwankungen können daher zu starken Sprüngen führen (z. B. Föhnzusammenbruch nach den Abendterminen am 14. und 28. Mai 1967).

Da aufgrund der Rechenmasse X oder X' entschieden wird, ob es sich bei einer bestimmten Beobachtung um einen Föhntermin handelt oder nicht, kann in unserem Falle das Rechenmass als **F ö h n m a s s** bezeichnet werden. In Abb. 9 ist der zeitliche Verlauf des Föhnmasses X' für den Mai 1967 in Bad Ragaz aufgetragen: je grösser X' , desto wahrscheinlicher handelt es sich beim betreffenden Termin um einen Föhnfall. Dieses Beispiel zeigt aber auch, dass in Wirklichkeit nicht an allen Terminen mit $X' > 0$ in Bad Ragaz Föhn herrscht.

In Abschnitt 3.2.5 war bereits aufgrund der t -Werte ersichtlich, dass bei jenen Jahrestestgruppen das Windmass mit deutlichem Vorsprung die beste Trennung erlaubt. Auch nach der Transformation bleibt diese Vorrangstellung in den neugebildeten Testgruppen bestehen, was die Abb. 7 a-c veranschaulichen. Dieses Schwergewicht wirkt sich in der Folge bei der Anwendung der Trennformel nachteilig aus, indem ein günstiges Windmass (SE-Wind mit Windstärke 2 oder mehr in Bad Ragaz) schlechte Werte der beiden anderen Föhnmerkmale zu kompensieren vermag. Dadurch können Beobachtungen mit beispielsweise mehr als 70 % relativer Feuchtigkeit als Föhntermin bezeichnet werden, was im Widerspruch zu der gebräuchlichen Föhndefinition steht. Um die Einzelbeobachtungen auch unter Ausschluss des Windes beurteilen zu können, wurde noch eine zweite Trennformel berechnet, welche nur die Temperatur- und Feuchtigkeitsabweichungen berücksichtigt.

Die besten Resultate lieferte die folgende Trennfunktion (für die Berechnung wurden die Februar- und Novembermonatstestgruppen zusammengefasst, sodass je 60 Föhn- und Nichtföhn-

termine Verwendung fanden):

$$M^a = 0.25 x_1 - 0.21 x_2 - 3.41 \quad (5.3 a)$$

$$M^b = -0.05 x_1 + 0.03 x_2 - 0.07 \quad (5.3 b)$$

wo: x_1 = Temperaturabweichung vom Terminmittel,
transformiert

x_2 = Feuchtigkeitsabweichung vom Terminmittel,
transformiert

$$M^a > M^b : \quad \text{Zuordnung zur Föhngruppe}$$

$$M^b > M^a : \quad \text{Zuordnung zur Nichtföhngruppe}$$

Die gemeinsame Trennformel und der Grenzwert X^* für nur zwei Variablen lautet:

$$X = 0.30 x_1 - 0.24 x_2 \quad (5.4)$$

$$X^* = 3.34$$

$$X > 3.34 : \quad \text{Zuordnung zur Föhngruppe}$$

$$X < 3.34 : \quad \text{Zuordnung zur Nichtföhngruppe}$$

6. Gestaffelte Anwendung zweier Trennfunktionen

Werden sämtliche 1095 Beobachtungen des Jahres 1967 von Bad Ragaz mit der Trennformel für drei Variablen getestet, so sind bei den 100 Föhnterminen keine, bei den Nichtföhnfällen jedoch 57 Fehlklassifikationen festzustellen. Andererseits ist bei Anwendung der Trennfunktion für nur zwei Variablen (Temperatur- und Feuchtigkeitsabweichung, ohne Berücksichtigung des Windes) die Anzahl Fehlbeurteilungen mit 1 Föhnfall und 112 Nichtföhnfällen erwartungsgemäss bedeutend grösser. In diesem Falle wird eine grössere Zahl von Mittagsterminen mit ausgeprägtem Talwind der Föhngruppe zugeteilt, da diese föhnähnliche Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse aufweisen und sich deshalb nur durch die dem Föhn entgegengesetzte Windrichtung unterscheiden lassen.

Die gestaffelte Anwendung beider Trennformeln bringt dagegen eine Verbesserung der Erfolgsrate. So werden die aufgrund der ersten Trennformel (= Primärtrennung: berücksichtigt Temperatur, Feuchtigkeit und Wind) sicheren Fälle ausgeschieden und die übrigen Beobachtungstermine mit der zweiten Trennformel (= Sekundärtrennung: berücksichtigt nur Temperatur und Feuchtigkeit) endgültig einer der beiden Gruppen zugeteilt. Als aus der ersten Trennung hervorgehende Grenzfälle werden alle Beobachtungstermine mit einer primären Föhnwahrscheinlichkeit von 0.2 bis ≤ 0.9999 ein zweites Mal getestet. Die untere Grenze musste bei $P_{\text{Föhn}} = 0.2$ festgelegt werden, damit die warmen und trockenen Mittagstermine mit Talwind aufgrund ihrer Windrichtung von den Grenzfällen ausgeschlossen bleiben. Die theoretische Wahrscheinlichkeit, dass bei Normalverteilung ein Föhntermin unter diesem Grenzwert liegt, beträgt 0.4 %; d.h. im Durchschnitt sollte alle zwei Jahre ein tatsächlicher Föhntermin schon bei der Primärtrennung falsch

klassiert werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Nichtföhntermin den oberen Grenzwert von $P = 0.9999$ erreicht oder überschreitet, liegt bei 0.01 % und kann daher vernachlässigt werden. In der Praxis treten allerdings solche Fälle häufiger auf (ca. 1 Fall in zwei Jahren), was auf die verwendeten Föhnkriterien zurückzuführen ist.

Für das Jahr 1967 ergeben sich folgende Zahlen:
Die Primärtrennung liefert 66 sichere Föhnfälle, 927 sichere Nichtföhnfälle und 102 Grenzfälle, welche die Sekundärtrennformel in 45 Föhn- und 57 Nichtföhnfälle aufteilt. Insgesamt werden also im Jahre 1967 aus den 1095 Beobachtungen 111 Föhntermine ausgeschieden. Der Vergleich mit den tatsächlichen Verhältnissen ergibt folgende Uebersicht:

	Zuordnung zur Gruppe			
	Föhn		Nichtföhn	
	richtig	falsch	richtig	falsch
Primärtrennung	65	1	927	-
Sekundärtrennung	33	12	55	2
Insgesamt	98	13	982	2

Von den 100 Föhnfällen fehlen nur zwei, während 13 Nichtföhnfälle fälschlicherweise der Föhngruppe zugeordnet wurden. Durch die Anwendung der Sekundärtrennformel erfolgte also eine Reduktion der Gesamtzahl von Fehlklassifikationen auf 15. Allerdings liegt diese Zahl bei den übrigen Jahren der Periode 1964-68 höher; im Mittel werden auf diese Weise pro Jahr 24 Fälle oder 2.2 % aller Termine falsch beurteilt.

7. Festlegung des Grenzwertes für die Föhnwahrscheinlichkeit der Föhnfälle

Für die Wahrscheinlichkeit P^g der Gruppenzugehörigkeit gilt bei nur zwei Gruppen gemäss Definition (Teil I, Abschnitt 3.2, Formel (7)):

$$P^a + P^b = 1$$

$$\begin{aligned} \text{wo: } P^a &= \text{Wahrscheinlichkeit für Föhn (= } P_{\text{Föhn}} \text{)} \\ P^b &= \text{Wahrscheinlichkeit für Nichtföhn} \end{aligned}$$

Der theoretische Grenzwert für die Zuordnung zu einer der beiden Gruppen beträgt daher $P^a = P^b = 0.5$. Sind die Rechenmasse X^g , welche den Wahrscheinlichkeitswerten P^g zugrunde liegen, in beiden Gruppen normal verteilt, so ist bei gleicher Gruppengrösse und Streuung für beide Gruppen dieselbe Anzahl von Fehlklassifikationen zu erwarten. In unserem Falle sind aber in Ragaz durchschnittlich zehnmal mehr Nichtföhn- als Föhntermine zu verzeichnen, was sich deutlich auf das Verhältnis der Fehlklassifikationen auswirkt (1967 z.B. 13 Nichtföhn- gegenüber 2 Föhnfällen). Das Missverhältnis wird noch verstärkt durch den Umstand, dass die Streuung der Rechenmasse in der Nichtföhngruppe grösser ist.

Durch eine Verschiebung der Grenze in Richtung höherer Föhnwahrscheinlichkeitswerte wird dieses Missverhältnis korrigiert und zugleich die totale Anzahl Fehlklassifikationen gesenkt. Praktisch kann die optimale Lage des Grenzwertes bestimmt werden, indem im kritischen Bereich alle Grenzfälle in Funktion der berechneten Föhnwahrscheinlichkeit $P_{\text{Föhn}}$ aufgezeichnet werden (Abb. 10). Unter der Annahme, dass die Jahre 1964-68 auch für den früheren Zeitraum repräsentativ seien, wurde die Grenze bei $P_{\text{Föhn}} = 0.85$ festgelegt.

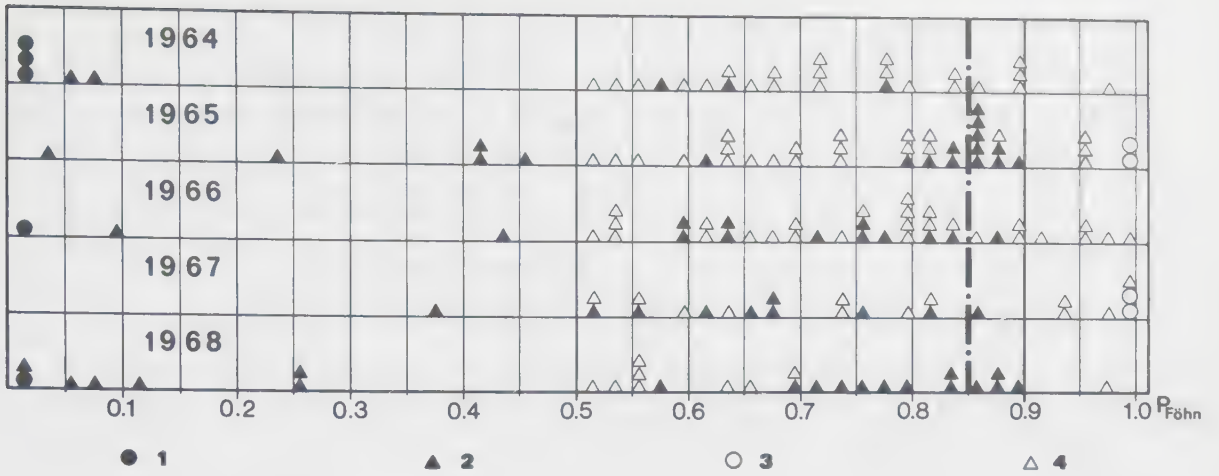


Abb.10 Verteilung der Beobachtungstermine von Bad Ragaz der Jahre 1964-68 in Abhängigkeit von der mit den beiden Trennformeln berechneten Föhnwahrscheinlichkeit ($P_{\text{Föhn}}$).

Im Bereich $0.5 < P_{\text{Föhn}} < 0.9$ wurden alle Beobachtungstermine eingezeichnet, während im übrigen nur sämtliche Fehlklassifikationen eingetragen sind.

Signaturen:

- 1 Föhnfall, primäre Föhnwahrscheinlichkeit < 0.2
- 2 Föhnfall, sekundäre Föhnwahrscheinlichkeit gemäss Diagramm
- 3 Nichtföhnfall, primäre Föhnwahrscheinlichkeit ≥ 0.9999
- 4 Nichtföhnfall, sekundäre Föhnwahrscheinlichkeit gemäss Diagramm

Alle Fälle mit $P_{\text{Föhn}} < 0.85$ werden der Nichtföhngruppe, diejenigen mit $P_{\text{Föhn}} \geq 0.85$ der Föhngruppe zugeteilt.

Die Auszählung ergibt für die fünf Jahre (1964-68) folgende Fehlklassifikationen:

	Föhnfälle, der Gruppe Nichtföhn zugeordnet	Nichtföhnfälle, der Gruppe Föhn zuge- ordnet
Aus Primärtrennung	5	4
Aus Sekundärtrennung	52	22
Insgesamt	57	26
Mittel pro Jahr	11	5

Im folgenden wird daher für die Zuordnung einer Beobachtung zur Föhngruppe verlangt, dass die Föhnwahrscheinlichkeit $P_{\text{Föhn}}$ der Sekundärtrennung mindestens 0.85 beträgt. Alle übrigen Termine werden den Nichtföhnfällen zugeordnet.

Auf diese Weise erhöht sich die Erfolgsrate nochmals. Zwar werden 1967 immer noch 15 Fälle (9 Föhn- und 6 Nichtföhnfälle) falsch zugeordnet, was nun aber dem Durchschnitt der Jahre 1964-68 entspricht (Abb. 10). Zugleich ist jetzt die Zahl der falsch klassierten Föhnfälle grösser als diejenige der Nichtföhnfälle. Dies bedeutet, dass Zweifelsfälle eher der Nichtföhngruppe zugeteilt werden, sodass die mit dieser Methode bestimmten Föhnhäufigkeiten im Durchschnitt etwas zu klein ausfallen.

8. Vergleich der automatisierten Trennung mit der subjektiven Beurteilung

Da es ohne sichere quantitative Kenntnis des eigentlichen Föhnmechanismus meines Erachtens wenig sinnvoll ist, zu den schon bestehenden verschiedenen Föhndefinitionen eine weitere hinzuzufügen, wurde bewusst versucht, die Trennung mit Hilfe des Trennverfahrens so zu gestalten, dass das Resultat möglichst gut mit der heute herrschenden Föhnvorstellung übereinstimmt.

8.1. Bestimmung der Föhntermine durch eine Gruppe von Versuchspersonen

Um ein Mass dafür zu erhalten, was im aktuellen Zeitpunkt im Durchschnitt als Föhn bezeichnet wird, wurde diese Frage einer Reihe von Personen vorgelegt: 14 Meteorologen, Klimatologen oder sonstige Fachleute der Meteorologischen Zentralanstalt in Zürich stellten sich in verdankenswerter Weise für diese Untersuchung zur Verfügung. Von ihnen wurden sämtliche Beobachtungstermine des für diese spezielle Untersuchung ausgewählten Jahres 1966 der Station Bad Ragaz beurteilt und nach folgendem Schema mit Punkten versehen:

Föhntermin in Bad Ragaz	1 Punkt
Eventueller Föhntermin (Zweifelsfall)	1/2 Punkt
Kein Föhntermin in Bad Ragaz	0 Punkte

In der Wahl der Föhnkriterien waren die Versuchspersonen völlig frei. Zusätzlich zu den drei in der Trennformel verwendeten Merkmalen wurden von einzelnen folgende Gesichtspunkte mitberücksichtigt:

Druckgradient Alpensüdseite - Alpennordseite
Windrichtung und -stärke auf dem Gütsch ob Andermatt
Gleichzeitige Föhntermine in Altdorf
Temperaturdifferenz Bad Ragaz - Zürich/Kloten (Flughafen)
Allgemeine Wetterlage: Bodenwetterkarte (1000 mb)
Absolute Topographie 500 mb
Terminbeobachtungen von weiteren Wetterstationen des
Klimanetzes:
in der Hauptsache von Chur, Sargans,
Heiden und vom Säntis

Wie weit die persönlichen Föhnvorstellungen auseinanderliegen, zeigt die folgende Zusammenstellung:

	Anzahl der von 14 Versuchspersonen subjektiv bestimmten Föhntermine des Jahres 1966 in Bad Ragaz	
	sicher	eventuell
Person mit der kleinsten Anzahl	54	48
Mittel der 14 Versuchspersonen	103	30
Person mit der grössten Anzahl	155	20

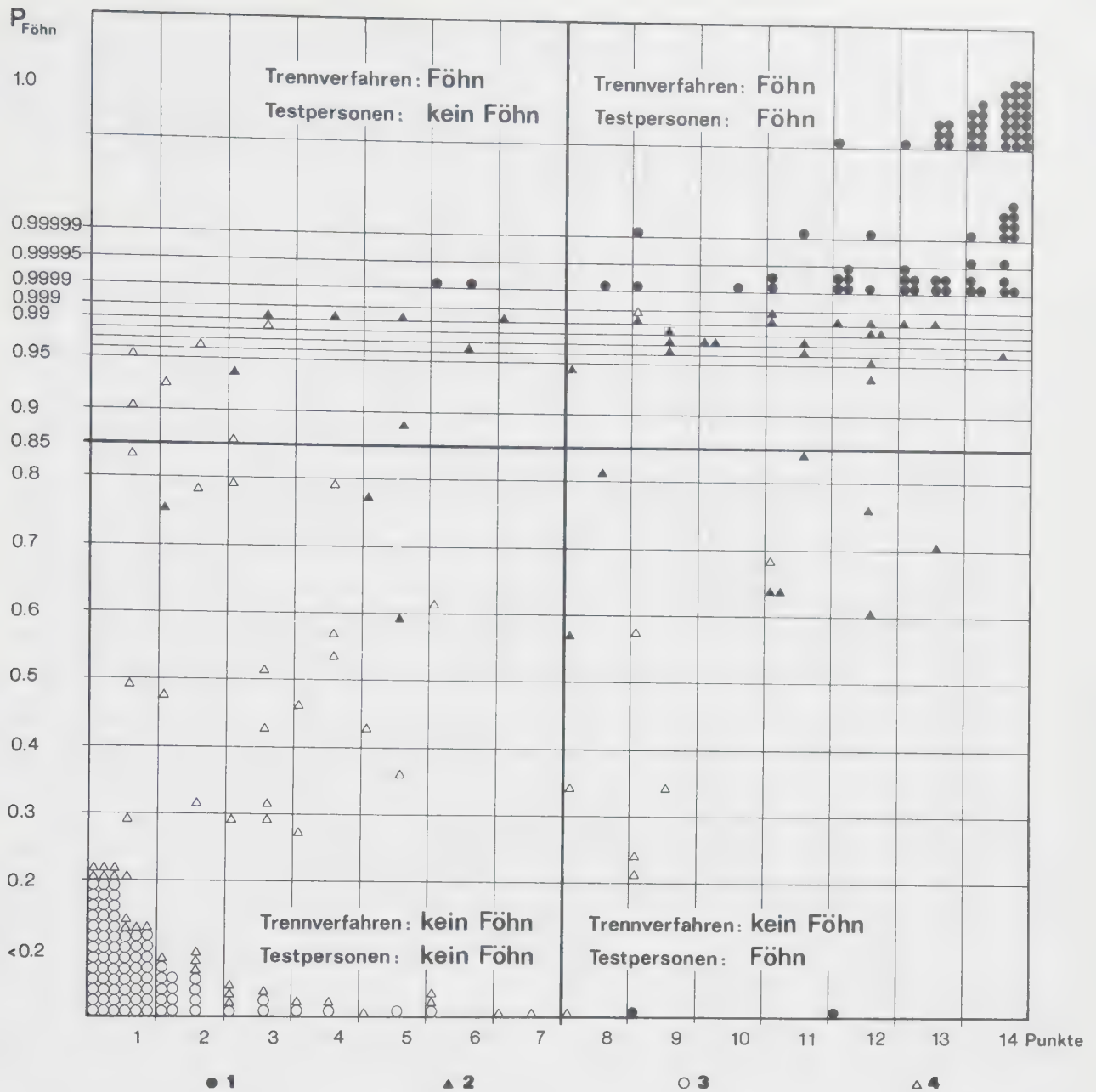


Abb.11 Vergleich der subjektiven Föhnvorstellung mit den Resultaten des Trennverfahrens zur Bestimmung der Föhntermine in Bad Ragaz: Beobachtungstermine des Jahres 1966 in Abhängigkeit von der erreichten totalen Punktzahl (Beurteilung durch 14 Fachleute) und der mit Hilfe der Trennfunktionen berechneten Föhnwahrscheinlichkeit $P_{Föhn}$. (Nicht dargestellt sind 834 sichere Nichtföhnfälle mit 0 Punkten und $P_{Föhn} < 0.2$).

Signaturen:

- 1 Föhnfall, Föhnwahrscheinlichkeit aus primärer Trennung
- 2 Föhnfall, Föhnwahrscheinlichkeit aus sekundärer Trennung
- 3 Nichtföhnfall, Föhnwahrscheinlichkeit aus primärer Trennung
- 4 Nichtföhnfall, Föhnwahrscheinlichkeit aus sekundärer Trennung

8.2. Vergleich mit den objektiven Resultaten

Wird das Punktetotal je Termin gegen die mit den Trennformeln berechnete Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit einer Beobachtung zur Föhngruppe aufgetragen (Abb. 11), so ergibt sich innerhalb der beiden sicheren Gruppen eine deutliche Uebereinstimmung, während in der Uebergangsgruppe grössere Unterschiede auftreten.

Tabelle 6 Vergleich der Erfolgszahlen der beiden Verfahren zur Bestimmung der Föhntermine in Bad Ragaz:

- A Durchschnitt der subjektiven Beurteilung durch 14 Fachleute (Föhnkriterien frei wählbar)
- B Objektive Beurteilung durch Trennverfahren (nur Temperatur, relative Feuchtigkeit und Wind in Bad Ragaz berücksichtigt)

A Subjektive Beurteilung	richtig	richtig	falsch	falsch	total
B Objektive Beurteilung	richtig	falsch	richtig	falsch	total
Föhnfälle	96	10	9	3	118
Nichtföhnfälle	963	7	6	1	977
Insgesamt	1059	17	15	4	1095

Tabelle 6 zeigt die Erfolgszahlen, wenn nur die beiden Alternativen Föhn oder Nichtföhn untersucht werden. Dabei wurden bei der subjektiven Beurteilung alle Termine mit 7 Punkten und mehr der Föhngruppe zugeordnet, während beim objektiven Verfahren eine Föhnwahrscheinlichkeit von 0.85 oder mehr verlangt wurde.

Trotz des Umstandes, dass beim angewandten Trennverfahren nur drei Föhnmerkmale der Station Bad Ragaz Verwendung fanden, während von den Untersuchungspersonen teilweise weitere Kriterien beigezogen wurden, sind die Erfolgswerte bei beiden Verfahren praktisch dieselben. Von allen falsch qualifizierten Terminen wurden vier von beiden Verfahren nicht richtig zugeordnet, während weitere 32 Termine nur von einem der beiden Verfahren der falschen Gruppe zugeteilt wurden.

Ungeachtet der bei der Bestimmung der Erfolge unangenehmen Tatsache, dass wegen der fehlenden eindeutigen Föhndefinition für eine kleine Zahl von Grenzfällen die richtige oder falsche Zuordnung nicht mit endgültiger Sicherheit festgestellt werden kann, zeigt dieser Vergleich, dass mit dem objektiven statistischen Verfahren (bei ausschliesslicher Verwendung von Daten der betreffenden Station) die Erfolgsrate zumindest die gleiche Grössenordnung aufweist wie die subjektive Beurteilung durch 14 Fachleute unter Zuhilfenahme beliebiger Föhnkriterien.

9. Analyse der Fehlklassifikationen und Bestimmung der Aussagekraft der objektiven Resultate

9.1. Ursachen der Fehlklassifikation

Während in den beiden Trennformeln nur örtliche Föhnmerkmale der Beobachtungsstation Bad Ragaz verwendet werden, mussten bei der subjektiven Bestimmung für jeden Föhnfall zu-

sätzlich die zwei folgenden häufig angewandten Föhnkriterien erfüllt sein:

1. $p_{\text{Alpensüdseite}} - p_{\text{Alpennordseite}} = \text{positiv (höherer Luftdruck südlich der Alpen)}$
2. Windrichtung auf dem Gütsch = 90 bis 220 Grad (Ueberströmen der Alpen von Süd nach Nord)

wo: p_i = Luftdruck am Boden

In der Folge ist bei 22 der 26 als Föhnfälle klassierten Nichtföhntermine der Jahre 1964-68 mindestens eine der obigen Bedingungen nicht erfüllt. Die restlichen vier Fälle können als Grenzfälle bezeichnet werden, welche aufgrund der angewandten Kriterien nicht eindeutig einer Gruppe zuzuordnen sind.

Bei den 57 Föhnfällen, welche in den fünf Jahren durch die Trennformeln als Nichtföhntermine bezeichnet wurden, waren im wesentlichen je zur Hälfte die Temperatur- und die Feuchtigkeitsverhältnisse ausschlaggebend. Da bei der Temperatur die Abweichungen vom langjährigen Terminmonatsmittel in die Trennfunktion eingehen, sind Föhntermine während einer Kaltperiode benachteiligt. Mit etwa fünf Terminen pro Jahr fallen diese jedoch nicht stark ins Gewicht. In den restlichen Fällen, bei denen in erster Linie die Feuchtigkeit für die Fehlbeurteilung verantwortlich ist, liegen die relativen Feuchtigkeiten meist zwischen 55 und 65 %. Solche Werte können nur durch einen deutlichen Temperaturüberschuss oder durch grössere Windstärke kompensiert werden.

9.2. Genauigkeit der objektiven Resultate

Aufgrund der Resultate der Jahre 1964-68 kann der Aussagewert der durch die Anwendung der Trennfunktionen gewonnenen Ergebnisse folgendermassen festgelegt werden (vgl. auch Abb. 10):

	Klassifikation 1964-68		Im Mittel zu erwartende Fehlklassifikationen	
	richtig	falsch	Anzahl Fälle pro Jahr	Prozent
Primärtrennung:				
Sichere Föhnfälle	341	4	0.8	1.2
Sichere Nichtföhnfälle	4583	5	1.0	0.01
Sekundärtrennung:				
Föhnfälle	163	22	4.4	13.5
Nichtföhnfälle	392	52	10.4	13.3
Insgesamt:				
Föhnfälle	504	26	5.2	4.2
Nichtföhnfälle	4975	57	11.4	1.1

Aus dem Grössenverhältnis der absoluten Fehlklassifikationen der beiden Gruppen ergibt sich, dass die errechneten Föhnhäufigkeiten eines Jahres 6 bis 7 % zu klein sind. Im langjährigen Durchschnitt dürfte diese Abweichung auch für die monatlichen Häufigkeiten zutreffen, wogegen bei den einzelnen Monatswerten mit grösseren Schwankungen gerechnet werden muss.

9.3. Miteinbezug grossräumiger Föhnkriterien in die Trennformeln

Es gilt an dieser Stelle auf die Frage einzugehen, warum die beiden bei der subjektiven Bestimmung so wichtigen Föhnkriterien (höherer Luftdruck südlich der Alpen und alpenüberquerende Komponente der Windrichtung auf dem Gütsch) nicht in die Trennformel aufgenommen wurden.

Zwei Gründe sind im wesentlichen dafür verantwortlich:

1. In vielen Fällen sind diese zwei Bedingungen erfüllt, ohne dass in Bad Ragaz Föhn herrscht: die Trenneigenschaft der beiden Variablen ist dadurch stark beeinträchtigt.
2. Je mehr Variablen in einer Trennfunktion berücksichtigt werden, desto kleiner ist das Gewicht der einzelnen Merkmale. Dies hat zur Folge, dass ein stark gegen Föhn sprechender Variablenwert (z. B. Nordwestwind oder 90 % relative Feuchtigkeit in Bad Ragaz) durch die übrigen Grössen kompensiert werden kann.

Bei der allgemein angewandten subjektiven Abgrenzung dürfen bestimmte kritische Werte der einzelnen Variablen bei Föhn nicht überschritten werden. Es treten daher mit dem objektiven Verfahren bei der Verwendung zusätzlicher Variablen überall dort neue Fehlklassifikationen auf, wo ein jenseits der Grenze liegender Variablenwert durch die übrigen Merkmale ausgeglichen wird.

Bei der Anwendung des Trennverfahrens mit vier oder fünf berücksichtigten Merkmalen ergab sich bei dieser Problemstellung eine Verschlechterung der Erfolgsrate, sodass auf den Miteinbezug der beiden grossräumigen Föhnkriterien in die Trennformel verzichtet werden musste.

10. Anwendung der entwickelten Trennfunktionen

10.1. Beobachtungsreihe Bad Ragaz 1939-1968

10.1.1. Beurteilung der verwendeten Transformationsparameter

Die vor der Anwendung der Trennformeln auszuführende Transformation der ursprünglichen Variablen beruht auf den fünfzehnjährigen Mittelwerten der Föhnmerkmale für die einzelnen monatlichen Termine (Tabelle 2). Diese wurden aus den Föhnterminen der Jahre 1949-58 und 1964-68 gewonnen und in der Folge als repräsentativ für die gesamte Untersuchungsperiode (1939-68) angenommen. Ein Vergleich mit den entsprechenden Mittelwerten der unabhängigen Periode 1939-48 diente der Überprüfung dieser Annahme und ergab folgendes Bild:

Die kleinsten Unterschiede sind bei der relativen Feuchtigkeit festzustellen, wo 1939-48 bei Föhn im Durchschnitt nur 2 bis 4 % niedrigere Werte gemessen wurden. Dagegen weichen die Föhntemperaturen in diesen Jahren im Mittel um ein Grad stärker vom dreissigjährigen Erwartungswert ab als in der Vergleichsperiode. Es wäre möglich, dass diese Abweichungen zumindest teilweise mit der im Jahre 1956 erfolgten geringfügigen Stationsverlegung zusammenhängen. Da die zehnjährigen Mittelwerte 1939-48 jedoch verglichen mit der dreissigjährigen Periode teilweise positive Temperatur- und negative Feuchtigkeitsabweichungen gleicher Grössenordnung aufweisen, dürften die festgestellten Differenzen zur Hauptsache auf das Vorherrschen bestimmter Wetterlagen in diesen Jahren zurückzuführen sein.

Leichter zu erklären sind die Unterschiede beim Windmass, welches bei den Föhnterminen 1939-48 im Mittel etwa eine Einheit tiefer liegt. Dies bedeutet, dass damals durchschnittlich grössere Windstärken beobachtet wurden, was auf einen im September 1949 erfolgten Beobachterinnenwechsel zurückzuführen ist. Die frühere Betreuerin der Wetterstation stufte die Föhnstär-

ken höher ein. So fällt nun bei der Verarbeitung das Windmass zu klein aus, wodurch eine zu hohe Föhnwahrscheinlichkeit errechnet wird. Durch eine Anpassung der Ausgangsparameter muss dieser systematische Fehler korrigiert werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die festgestellten Abweichungen bei den Ausgangsparametern aller drei Föhnmerkmale deutlich unter der Grössenordnung der relativen tag- und jahreszeitlichen Schwankungen liegen, sodass letztere durch die verwendeten fünfzehnjährigen Werte meist gut wiedergegeben werden.

10.1.2. Die Fehlerrate in früheren Jahren

Die Ueberprüfung der Fehlerrate, welche in Abschnitt 9.2 für die Jahre 1964-68 bestimmt wurde, erfolgte stellvertretend am unabhängigen Jahr 1943, welches mit 117 Terminen eine überdurchschnittliche Föhnhäufigkeit aufwies. Der Vergleich der durch das Trennverfahren gelieferten mit den subjektiv bestimmten Föhnterminen zeigt, dass die Anzahl Fehlklassifikationen mit total 12 (4 von der Primär- und 8 von der Sekundärtrennformel) etwas unter dem erwarteten Wert liegt. Allerdings fiel 1943 die objektiv errechnete Föhnhäufigkeit um zwei Fälle zu hoch aus, während sich bekanntlich in den fünf Testjahren ein im Durchschnitt etwa sechsprozentiges Defizit ergab.

Auch in diesem Jahr waren für die Fehlzuteilungen im wesentlichen die in Abschnitt 9.1 beschriebenen Ursachen verantwortlich. In den unabhängigen früheren Jahren darf daher mit einer ähnlichen Genauigkeit der Resultate gerechnet werden, wie sie für die fünf Testjahre festgelegt wurde.

10.1.3. Die Föhnhäufigkeiten von 1939 bis 1968

Die dreissigjährigen Mittelwerte der monatlichen Föhnhäufigkeiten in Bad Ragaz zeigen einen ähnlich ausgeprägten Jahresgang, wie er von anderen Autoren beispielsweise für die Föhnorte Altdorf (FREY¹² und SCHUEPP²³) und Glarus (STREIFF-BECKER²⁶) schon beschrieben wurde. Das Hauptmaximum fällt mit 13 Terminen pro Monat in den April. Nach den sommerlichen Tiefstwerten (Minimum mit nur 3 Terminen pro Monat im Juli) wird im November mit 11 Terminen der herbstliche Spitzenwert erreicht.

Dass die dreissigjährigen Durchschnittswerte und in stärkerem Masse die zehnjährigen Mittel der Periode 1939-68 stark zufallsbedingt sind, geht aus der Zusammenstellung in Tabelle 7 hervor:

Tabelle 7 Langjährige Mittelwerte der absoluten Föhnhäufigkeiten (Anzahl Föhntermine) in Bad Ragaz für die Jahre 1939-68.

Mittel	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
1939-48	10.8	8.8	12.2	13.4	12.5	3.8	4.2	4.4	5.4	9.9	7.4	8.5	101.3
1949-58	6.7	7.8	11.7	9.5	10.5	5.4	3.2	4.1	4.7	4.8	9.5	10.8	88.7
1959-68	9.7	11.9	14.9	16.2	10.2	5.5	2.0	3.4	6.0	10.9	15.4	8.5	114.6
1939-68	9.1	9.5	12.9	13.0	11.1	4.9	3.1	4.0	5.4	8.5	10.8	9.3	101.5

Die teilweise auftretenden starken Unterschiede bei den zehnjährigen Mittelwerten (z.B. im November 7.4 (1939-48) zu 15.4 (1959-68) Termine) liegen in den ausgeprägten Schwankungen der einzelnen Jahre begründet, welche ihrerseits auf die starken monatlichen Unterschiede zurückzuführen sind. So streut in den verschiedenen Monaten dieser dreissig Jahre die Anzahl Föhntermine von 0 bis 33 (März 1959). Fallen nun mehrere Jahre mit extremen Föhnhäufigkeiten in die gleiche Periode, erfährt dadurch der Mittelwert eine beträchtliche Veränderung.

ABSOLUTE FOEHNHAEUFIGKEITEN

Abb.12

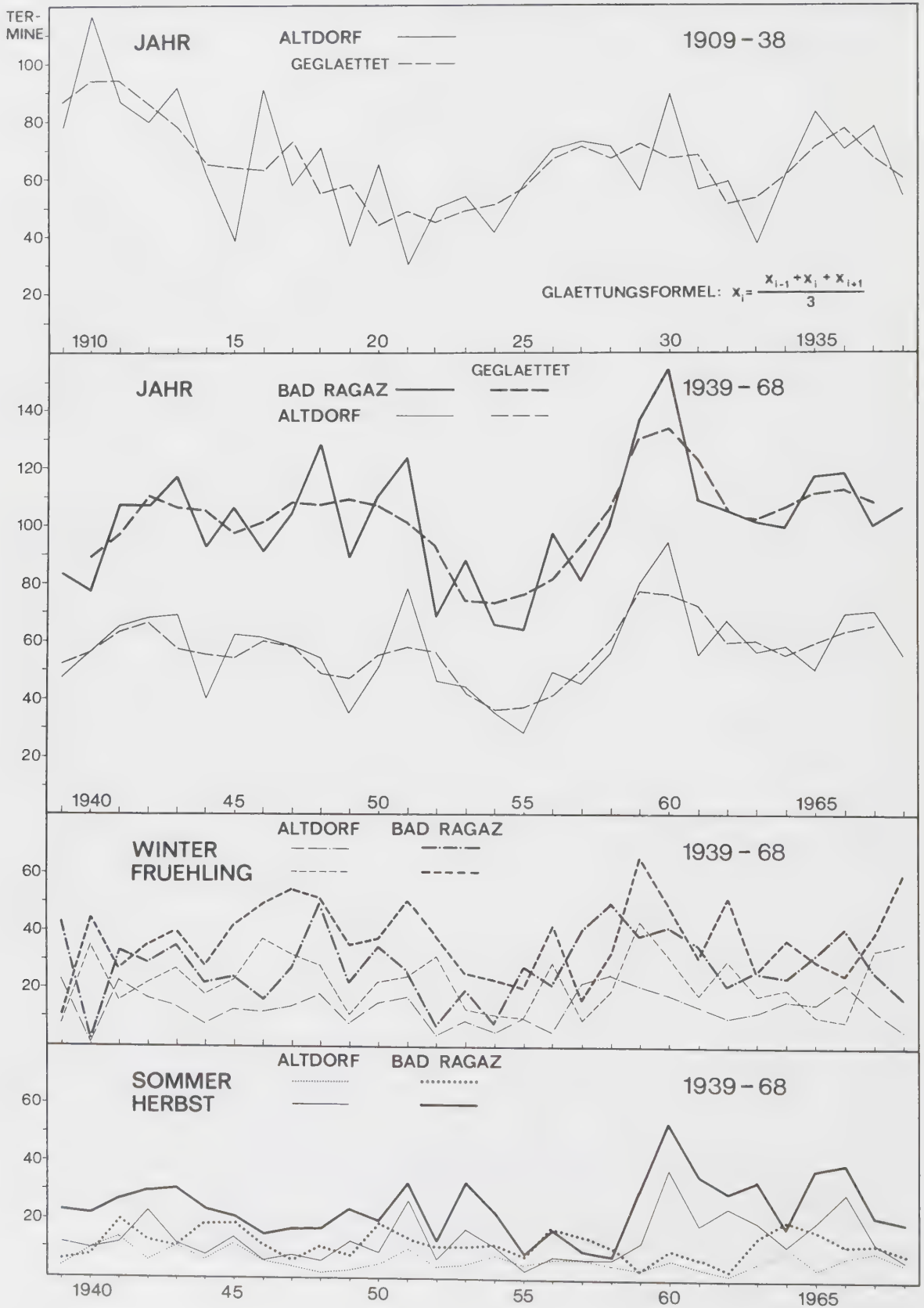


Abb. 12, welche den Verlauf der jährlichen und jahreszeitlichen Föhnhäufigkeiten innerhalb der untersuchten Periode zeigt, lässt keine sich wiederholende Periodizität erkennen. Die Schwankungen müssen daher als zufällig bezeichnet werden. Dagegen lassen sich drei Zeitabschnitte unterscheiden: Die Jahre 1941-51 mit einer mittleren, die folgenden sechs Jahre bis 1957 mit einer geringen und die anschliessenden Jahre bis 1968 mit einer überdurchschnittlichen Föhnhäufigkeit. Durch das gleichzeitige Eintreffen übernormaler Werte im Frühling und Herbst wurde 1960 mit insgesamt 154 Terminen (Mittel 1939-68: 102 Termine) in Bad Ragaz die grösste Föhnhäufigkeit dieser dreissig Jahre beobachtet.

Zwischen den Häufigkeitsschwankungen der verschiedenen Jahreszeiten (Abb. 12 unten) ist ebenfalls kein Zusammenhang ersichtlich, sodass auch diese Werte als voneinander weitgehend unabhängig angesehen werden müssen.

Wird für die Periode 1939-68 die tägliche absolute Föhnhäufigkeit über alle dreissig Jahre untersucht, zeigen sich vor allem in den föhnreicheren Jahreszeiten zahlreiche Spitzenwerte. Aus den Anteilen der Zehnjahresperioden geht jedoch hervor, dass die genaue Lage der Maxima zufallsbedingt ist. Werden je fünf aufeinanderfolgende Tage zu Pentaden zusammengefasst, so entsteht ein ausgeglichenerer Kurvenverlauf (Abb. 13 oben) mit weniger Gipfelpunkten.

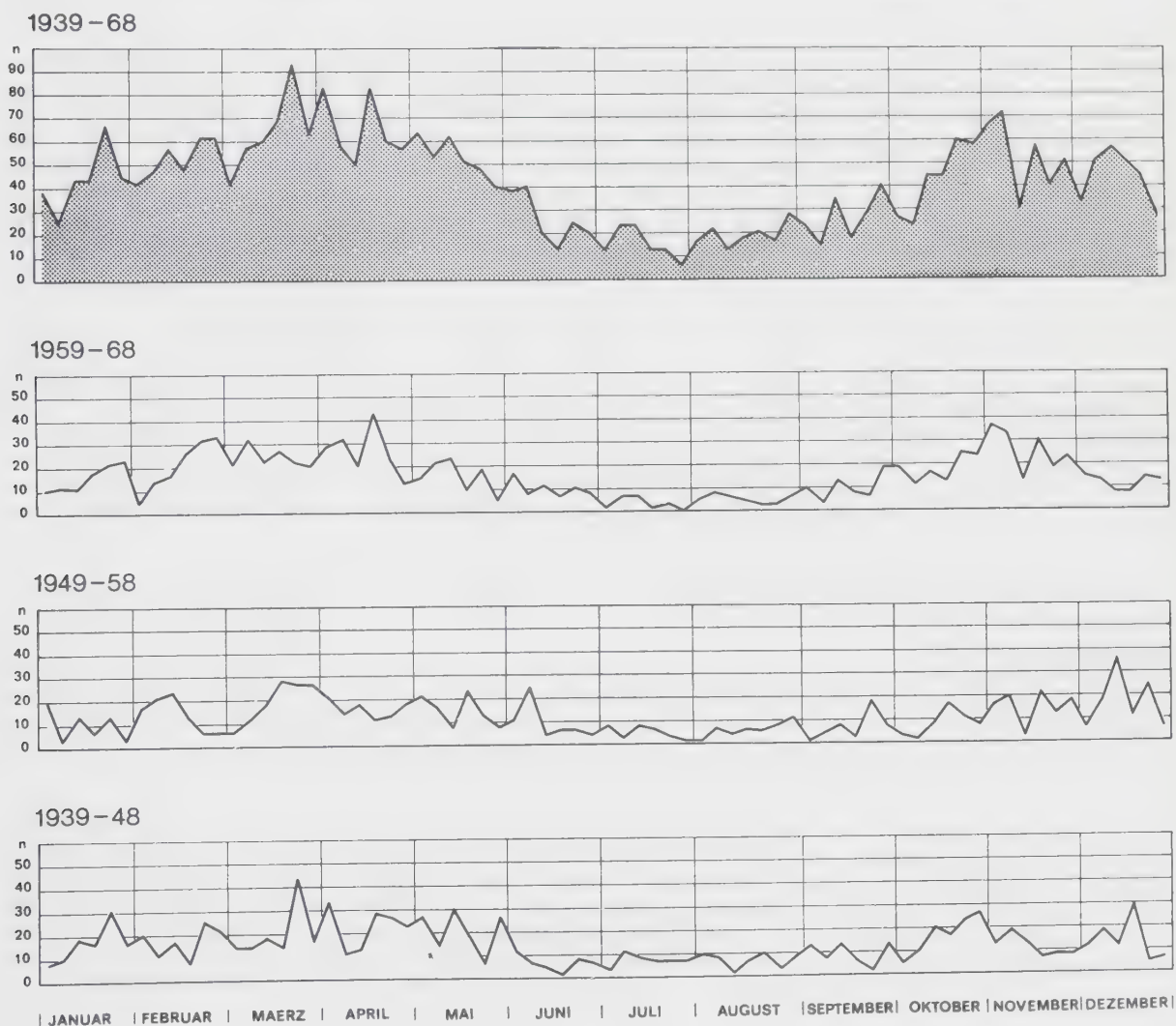


Abb. 13 Absolute Pentadenföhnhäufigkeit (Anzahl Beobachtungstermine (n) mit Föhn) in Bad Ragaz für den dreissigjährigen Zeitraum 1939-68 und die zugehörigen drei zehnjährigen Teilperioden.

Auch hier tritt aber bei einem Vergleich mit den Häufigkeitskurven der drei Teilperioden (Abb. 13 unten) deutlich das Zufallsmoment in Erscheinung. Vergleicht man die Lage der einzelnen Spitzenwerte mit den Verhältnissen in Altdorf, wie sie von SCHUEPP²³ für die Jahre 1894-1909 und 1924-1939 bestimmt wurden, so sind deutliche Abweichungen einzelner Singularitäten festzustellen. Eine genaue zeitliche Datierung der Maximastellen dürfte daher kaum über die untersuchte Periode hinaus einen Aussagewert besitzen.

Da in Altdorf im Gegensatz zu Bad Ragaz der Föhn erst bei kräftigeren Südstau- oder Westlagen zum Durchbruch gelangt, gibt die zitierte Föhnhäufigkeitskurve von SCHUEPP²³ indirekt einen Hinweis auf das mittlere Auftreten entsprechender Wetterlagen im Jahresablauf. Durch den Miteinbezug auch schwächerer Föhn Situationen in Bad Ragaz entsteht für diesen Ort ein weicherer Kurvenverlauf. Im Gesamtjahresgang sind jedoch gegenüber Altdorf keine wesentlichen Unterschiede festzustellen.

10. 2. Beobachtungsreihe Altdorf 1901 - 1968

10. 2. 1. Verwendung der Trennformeln der Station Bad Ragaz

Theoretisch sind die für die Station Bad Ragaz berechneten Trennformeln nur dort anwendbar, da sie die ortsspezifische Bedeutung der einzelnen Föhnmerkmale berücksichtigen. Da die Station Altdorf jedoch eindeutigere Föhnverhältnisse aufweist, wirken sich kleine lokale Unterschiede nicht wesentlich auf die Föhnabgrenzung aus. Ausserdem wird die Föhnströmung durch das Reusstal ebenfalls stark kanalisiert, sodass auch hier die Trenneigenschaften des Windmasses eine Vorzugstellung einnehmen. Einer Verwendung der Ragazer Trennformeln stand daher nichts Grundsätzliches im Wege.

Tabelle 8 Zehnjährige Monats- und Jahresmittelwerte der Föhnmerkmale in Bad Ragaz und Altdorf (sämtliche Beobachtungstermine mit Föhn aus den Jahren 1959-68).

Monat	Abweichungen vom monatlichen Terminmittel 1939-68				Windmass		Anzahl Föhn- ter- mine 1959-1968	
	Temperatur (Grad Celsius)		rel. Feuchtigkeit (%)					
	Ragaz	Altdorf	Ragaz	Altdorf	Ragaz	Altdorf	Ragaz	Altdorf
Januar	8.6	11.1	-31	-42	7.8	5.0	97	50
Februar	7.7	10.6	-27	-41	8.2	4.6	126	54
März	5.5	8.0	-25	-34	8.2	5.8	154	85
April	4.7	7.5	-21	-31	8.8	6.6	158	103
Mai	4.3	6.0	-19	-32	9.3	6.5	106	60
Juni	4.8	7.2	-21	-32	9.4	7.5	53	37
Juli	5.2	6.4	-23	-35	9.6	8.4	18	5
August	5.9	8.7	-29	-38	9.9	8.4	36	14
September	4.4	7.2	-26	-41	8.8	6.3	61	35
Oktober	6.5	9.9	-31	-41	8.4	5.5	107	65
November	6.9	9.8	-31	-41	7.4	4.4	160	96
Dezember	6.6	10.1	-31	-43	7.8	4.5	92	54
Jahr	6.0	8.8	-26	-37	8.4	5.7	1168	658

Nach dem ersten Versuch zeigte sich, dass für Altdorf eigene Transformationsparameter berechnet werden müssen, da die Föhntermine hier stärker von den langjährigen Mittelwerten abweichen, als dies in Bad Ragaz der Fall ist. Tabelle 8 zeigt die entsprechenden Unterschiede zwischen den beiden Föhnstationen für die Jahre 1959-68. Dass in Altdorf durch die Verwendung spezieller Transformationsparameter mit der Ragazer Trennformel gute Resultate erzielt werden, soll das folgende Kapitel zeigen.

10.2.2. Fehlerrate des Trennverfahrens in Altdorf

Auch für diese Station wurde an ausgewählten Jahren die Fehlerrate bestimmt, indem die objektiven Resultate des Trennverfahrens mit den subjektiv bestimmten Föhnterminen verglichen wurden.

In den Jahren 1964-68 ergaben sich folgende Verhältnisse (die Prozentzahlen beziehen sich auf die Anzahl subjektiv festgestellter Föhnfälle):

	19..	64	65	66	67	68	total	Mittel pro Jahr	
								abs.	%
Primäre Trennung:									
Föhntermine als Nichtföhn bezeichnet		1	1	1	-	-	3	0.6	1.0
Nichtföhntermine als Föhn bezeichnet		-	-	-	-	-	0	0.0	0.0
Sekundäre Trennung:									
Föhntermine als Nichtföhn bezeichnet		1	3	3	1	2	10	2.0	3.3
Nichtföhntermine als Föhn bezeichnet		-	-	3	4	4	11	2.2	3.7
Insgesamt:									
Föhntermine als Nichtföhn bezeichnet		2	4	4	1	2	13	2.6	4.3
Nichtföhntermine als Föhn bezeichnet		-	-	3	4	4	11	2.2	3.7
Total Fehlklassifikationen		2	4	7	5	6	24	4.8	8.0
Anzahl Föhnfälle (subjektiv bestimmt):		60	54	70	67	53	304	60.8	100.0

Aus der Zusammenstellung folgt, dass die absolute Föhnhäufigkeit im Mittel in diesen Jahren recht genau bestimmt wurde; für die Einzeljahre muss hingegen mit beidseitigen Abweichungen bis 10 % gerechnet werden.

In früheren Jahren liegen mit beispielsweise total 7 Fehlklassifikationen (= 11 %) im Jahre 1943 und total 6 (= 5 %) im Jahre 1910 Fehlerraten ähnlicher Grössenordnung vor.

10.2.3. Die Föhnhäufigkeiten von 1901 bis 1968

Um den Verlauf der Föhnhäufigkeiten über einen längeren Zeitraum verfolgen zu können, wurden für die Stationen Altdorf zusätzlich die Beobachtungen der Jahre 1901 bis 1938 mit dem Trennverfahren geprüft. Die Jahreswerte sind ab 1909 ebenfalls in die Abb. 12 aufgenommen worden.

Der geglättete Kurvenverlauf veranschaulicht die unregelmässige zeitliche Lage und Dauer von Perioden mit durchschnittlich grösserer Föhnhäufigkeit. Eine diesbezügliche Gesetzmässigkeit ist nicht festzustellen. So wurde auch der von EKHART⁶ aufgrund der Föhnverhältnisse in Innsbruck postulierte allmähliche Rückgang der Föhnhäufigkeiten seit 1912 in der zweiten Hälfte der Fünfzigerjahre abgeschlossen. Seit dem stark übernormalen Jahr 1960 mit 94 Föhnterminen (bisheriges Maximum dieses Jahrhunderts mit 116 Terminen im Jahre 1910) schwanken die Jahressummen nur unbedeutend um das sechzigjährige Mittel von 61 Terminen pro Jahr.

Die monatlichen und jährlichen Durchschnittswerte längerer Perioden der vergangenen dreissig Jahre sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 9 Langjährige Mittelwerte der absoluten Föhnhäufigkeiten (Anzahl Föhntermine) in Altdorf für die Jahre 1939-68.

Mittel	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
1939-48	4.9	5.0	8.5	8.8	7.3	2.2	3.1	2.2	3.3	4.8	3.0	4.4	57.5
1949-58	3.1	3.8	6.2	5.7	6.0	3.0	0.5	2.4	2.8	2.0	6.1	5.1	46.7
1959-68	5.1	5.5	8.5	10.3	6.2	3.7	0.8	1.5	3.5	6.5	9.7	4.1	65.4
1939-68	4.4	4.8	7.7	8.3	6.5	3.0	1.5	2.0	3.2	4.4	6.2	4.5	56.5

Auch in den früheren zehnjährigen Perioden schwanken die Jahresmittel stark, was aus den folgenden Zahlen hervorgeht:

	1909-18	1919-28	1929-38	1909-38	1909-68	1901-60
Mittlere jährliche Föhnhäufigkeit (Anzahl Termine/Jahr)	77.5	55.1	64.4	65.7	61.1	61.4

10.3. Vergleich der Föhnverhältnisse in Bad Ragaz und Altdorf

10.3.1. Anwendbarkeit der Trennformel und Fehlerraten

Die schon wiederholt erwähnten weniger eindeutigen Föhnverhältnisse in Bad Ragaz wirken sich auch bei den Durchschnittswerten der Föhnmerkmale (Tabelle 8) aus.

Im Mittel ist der Temperaturüberschuss eines Föhntermins in Bad Ragaz 2.8 Grad Celsius niedriger als in Altdorf, während die relative Feuchtigkeit um 11 % weniger stark vom langjährigen Mittel abweicht. Im weiteren ergeben die bei Föhn in Bad Ragaz durchschnittlich nur etwa halb so grossen Windstärkeschätzungen für diesen Ort ein um 2.7 höheres Windmass. Durch die Verwendung stationeigener Transformationsparameter wurden diese lokalen Unterschiede berücksichtigt. Die ausgeprägteren Föhnmerkmale in Altdorf bewirken bei der Anwendung der Trennformeln eine Verkleinerung der Fehlerrate. Während in den Jahren 1964-68 in Bad Ragaz durchschnittlich pro Jahr 16 Beobachtungstermine falsch klassifiziert werden, sind es in Altdorf nur noch 5. Dies zeigt, dass die normalerweise eindeutige Abgrenzung der Föhnsituationen in Altdorf die Anwendung des Trennverfahrens erleichtert.

10.3.2. Die Föhnhäufigkeiten

Beim Vergleich der dreissigjährigen Mittel von Bad Ragaz und Altdorf zeigt sich eine 1.8 mal grössere Föhnhäufigkeit im Rheintal (101 (= 180 %) gegenüber 56 Terminen pro Jahr). Daraus folgt, dass hier der Föhn rascher bis auf den Talgrund durchbricht, als dies im Reusstal bei Altdorf der Fall ist. Dass im wesentlichen nicht lokale Föhneffekte dieses Grössenverhältnis bewirken, geht aus Abb. 12 hervor: Der weitgehend gleichsinnige Verlauf sowohl der jährlichen als auch der jahreszeitlichen Kurven beider Föhnorte belegt die gemeinsame Ursache der Föhnerscheinungen in den beiden Tälern. Da in verschiedenen Jahren der Anteil schwacher Föhnlagen an deren Gesamtzahl nicht konstant ist, variiert in der Folge auch das Verhältnis der Anzahl Föhntermine beider Stationen. So wurde im Jahre 1949 mit 89 (= 255 %) zu 35 Föhnterminen pro Jahr in Bad Ragaz der grösste prozentuale Ueberschuss der vergangenen dreissig Jahre festgestellt (grösserer Anteil schwächerer Föhnlagen), während 1940 mit 77 (= 138 %) zu 56 Terminen das Verhältnis Bad Ragaz - Altdorf am kleinsten ausfiel.

Im weiteren zeigt eine Untersuchung der verschiedenen Jahreszeiten (Tabelle 10), dass der Föhn in Altdorf, verglichen mit Bad Ragaz, im Frühling relativ häufiger, im Winter dagegen seltener bis ins Tal vorstösst, wogegen die Verhältnisse im Sommer und Herbst etwa dem Jahresdurchschnitt entsprechen.

Tabelle 10 Jahreszeitlicher Vergleich der absoluten Föhnhäufigkeiten in Bad Ragaz (R) und Altdorf (A). Die Prozentzahlen (%) beziehen sich auf die Anzahl Föhntermine in Altdorf.

Periode	Frühling			Sommer			Herbst			Winter		
	A	R	%	A	R	%	A	R	%	A	R	%
1939-48	246	381	155	75	124	165	111	227	205	143	281	196
1949-58	179	317	177	59	127	215	109	190	174	120	253	211
1959-68	250	413	165	60	109	182	197	323	164	147	301	205
1939-68	675	1111	164	194	360	185	417	740	182	410	835	203

Die recht hohen Föhnhäufigkeiten in Bad Ragaz gelten jedoch, wie im Teil III, Abschnitt 3 näher ausgeführt werden soll, nur für diesen Teil des Rheintales, liegen doch die entsprechenden Zahlen für Buchs SG bereits etwas unter denjenigen von Altdorf.

11. Der Einfluss des Föhns auf die Temperaturmittelwerte von Bad Ragaz und Altdorf

Aus den Föhnhäufigkeiten (Tabelle 7 und 9) und den durchschnittlichen Temperaturabweichungen der Föhntermine (Tabelle 8) lassen sich die durch den Föhn bewirkten Temperaturerhöhungen der Monats- und Jahresmittel berechnen.

Wie aus Tabelle 11 hervorgeht, erfahren in Bad Ragaz die Monatsmittel der Temperatur im Durchschnitt eine Erhöhung von 0.2 bis 0.9 Grad Celsius (Altdorf: 0.1 bis 0.7 Grad). Beim Jahresmittel beträgt der entsprechende Wert 0.6 Grad (Altdorf 0.5 Grad). Diese Ergebnisse stimmen mit den Berechnungen von PERNTER (zitiert in UNDT²⁷) für Innsbruck (Sommer +0.1, Winter +0.8, Jahr +0.6 Grad) gut überein.

In Monaten mit maximaler Föhnhäufigkeit wird hingegen das zugehörige Temperaturmittel in Bad Ragaz bis 2.8 Grad, in Altdorf bis 2.5 Grad erhöht, was ebenfalls der Tabelle 11 zu entnehmen ist.

Die klimatische Begünstigung der Föhntäler ist daher in föhnreichen Jahren beträchtlich. Rasche Schneeschmelze, Verlängerung der Vegetationszeit und Verbesserung der Wachstumsbedingungen sind die wichtigsten positiven Auswirkungen des Föhns in diesen Gebieten.

Tabelle 11 Durchschnittliche und maximale durch den Föhn bedingte Temperaturerhöhungen der Monats- und Jahresmittel in Bad Ragaz und Altdorf.

Monat	Absolute Föhnhäufigkeiten Anzahl Termine 1939-68				Temperaturerhöhung Grad Celsius			
	Mittel		Maximum (Jahr)		Mittel		Maximum	
	Ragaz	Altdorf	Ragaz	Altdorf	Ragaz	Altdorf	Ragaz	Altdorf
Januar	9.1	4.4	28 (1939)	15 (1939)	0.8	0.5	2.6	1.8
Februar	9.5	4.8	30 (1966)	15 (1966)	0.9	0.6	2.8	1.9
März	12.9	7.7	33 (1959)	25 (1960)	0.8	0.7	2.0	2.2
April	13.0	8.3	30 (1968)	19 (1962)	0.7	0.7	1.6	1.6
Mai	11.1	6.5	27 (1945)	22 (1967)	0.5	0.4	1.3	1.4
Juni	4.9	3.0	11 (1964)	8 (1941)	0.3	0.2	0.6	0.6
Juli	3.1	1.5	9 (1950)	7 (1940)	0.2	0.1	0.5	0.5
August	4.0	2.0	9 (1943)	9 (1943)	0.2	0.2	0.6	0.8
September	5.4	3.2	21 (1965)	12 (1965)	0.3	0.3	1.0	1.0
Oktober	8.5	4.4	28 (1960)	21 (1960)	0.6	0.5	2.0	2.2
November	10.8	6.2	30 (1963)	23 (1951)	0.8	0.7	2.3	2.5
Dezember	9.3	4.5	25 (1958)	14 (1957)	0.7	0.5	1.8	1.5
Jahr	101.5	56.5	154 (1960)	94 (1960)	0.6 (0.56)	0.5 (0.45)	0.8 (0.84)	0.8 (0.76)

III. DIE FOEHNVERHAELTNISSE IM RHEINTAL ZWISCHEN CHUR UND ALTSTAETTEN VOM JULI 1967 BIS JUNI 1969

1. Einführung

Obschon es sich beim ausgeprägten Südföhn der Alpennordseite um eine grossräumige Erscheinung handelt, weiss man, dass in den verschiedenen Tälern (Rheintal, Linthtal, Reusstal, Haslital und Rhonetal, um nur die wichtigsten zu nennen) bei Föhn lokal bedingte Unterschiede zu verzeichnen sind. Umfangreichere Bearbeitungen liegen über die Verhältnisse im Reusstal (Beobachtungsstation Altdorf, FREY¹² u. a.), im Linthtal (STREIFF-BECKER²⁵, WALTER²⁹ u. a.) und im Rhonetal (BOUËT^{3,4}) vor. Zwar wird das Rheintal im Zusammenhang mit dem Föhn häufig erwähnt, doch fehlte bis heute eine genauere Untersuchung. Dafür verantwortlich war nicht zuletzt der Umstand, dass in diesem Gebiet weniger eindeutige Verhältnisse herrschen und damit in vielen Fällen aufgrund der Angaben der Meteorologischen Stationen allein keine sichere Abgrenzung der einzelnen Föhnphasen möglich war. Zudem fehlten im Rheintal bis vor wenigen Jahren Windregistriergeräte.

Im Zusammenhang mit Lokalwinduntersuchungen wurden erstmals im Herbst 1965 durch den Kanton Graubünden Windmesser vom Typ Woelfle eingesetzt. Die Auswertungen jener Registrierungen zeigten, dass solche Windmesser im Rheintal, über einen grösseren Zeitraum aufgestellt, wertvolle Ergebnisse über das Auftreten des Föhns liefern könnten. Daher wurde im Sommer 1967 für eine zweijährige Periode (Juli 1967 - Juni 1969) ein erweitertes Stationsnetz aufgebaut.

Die nachfolgenden Ausführungen bringen eine erste Auswertung des angefallenen Beobachtungsmaterials dieser zwei Jahre. Im Anschluss an diese Untersuchungen ist beschlossen worden, die Windmessungen an drei Stationen (Landquart, Fläscherberg und Schaan) fortzusetzen. Damit ist die Möglichkeit geschaffen, in einem späteren Zeitpunkt eine längere Periode zu bearbeiten und auf diese Weise die vorliegenden Ergebnisse eines verhältnismässig kurzen Zeitraumes zu überprüfen.

Den vorliegenden Auswertungen liegen zwei Zielsetzungen zugrunde:

1. Darstellung lokaler Unterschiede bei Föhn im Rheintal.
2. Vergleich mit den Verhältnissen in Altdorf (welche im allgemeinen als für die Alpennordseite repräsentativ gelten).

2. Das Stationsnetz

Beobachtungen und Messresultate folgender Stationen des Rheintales und angrenzender Gebiete wurden in die Untersuchung miteinbezogen (Abb. 14):

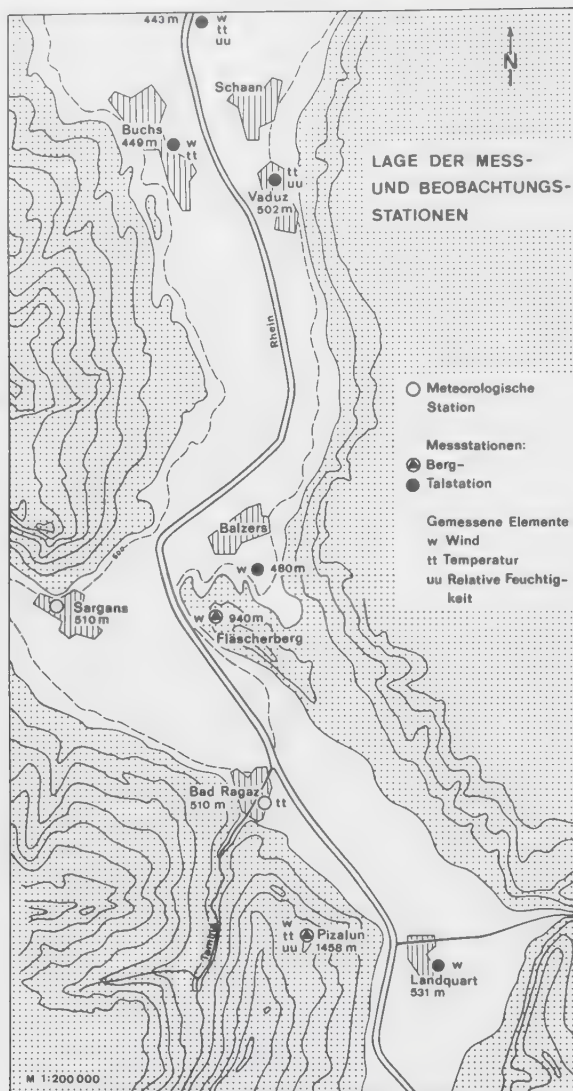


Abb. 14 Beobachtungsnetz im Abschnitt Landquart-Buchs des Rheintales während der zweijährigen Untersuchungsperiode (Juli 1967 - Juni 1969).

Meteorologische Stationen (Klimanetz) mit täglich drei Beobachtungen:

Station	Höhe/M	allgemeine Lage	geogr. Lage λ φ	Zusätzliche Re- gistrierungen	In Betrieb seit
Chur	586 m	Tallage	9°32' 47°00'	Temperatur, rel. Feuchtigkeit	1887
Bad Ragaz	510 m	Tallage	9°30' 47°00'	Temperatur	1939
Sargans	510 m	Hanglage (25 m über Talgrund)	9°26' 47°03'		1864
Altstätten	465 m	Hanglage (35 m über Talgrund)	9°33' 47°23'		1864
Heiden	811 m	Hanglage (nach NE abfallend)	9°32' 47°27'		1887
Rorschach	420 m	Tallage	9°30' 47°29'		1901
Säntis	2500 m	Gipfelstation	9°21' 47°15'	Temperatur, rel. Feuchtigkeit	1888

Zusätzliche Stationen (vom Juli 1967 - Juni 1969 ganz oder teilweise in Betrieb) mit durchgehenden Registrierungen:

Station	Höhe/M	allgemeine Lage	geogr. λ	Lage φ	Registrierte met. Elemente	Besondere Be- triebszeiten
Landquart/ Plantahof	531 m	Talmitte	9° 34'	46° 58'	Wind	Ausfälle total 3 Monate
Pizalun	1458 m	Vorgipfel	9° 32'	46° 58'	Wind, Tempera- tur, relative Feuchtigkeit	Ausfälle total 3 Monate
Fläscher- berg	940 m	Gratlage	9° 30'	47° 03'	Wind	keine Ausfälle
Balzers*	480 m	Tallage	9° 30'	47° 03'	Wind	Dez. 67 bis Feb. 69 mit Un- terbrüchen
Räfis/ Buchs	449 m	Tallage	9° 29'	47° 09'	Wind, Tempera- tur	Ausfälle total 1 Monat
Vaduz*	502 m	Hanglage (50 m über Talgrund)	9° 31'	47° 09'	Temperatur, rel. Feuchtigkeit	bis 31. 3. 1968
Schaan*	443 m	Talmitte	9° 29'	47° 11'	Temperatur, rel. Feuchtigkeit	ab 1. 4. 1968

* Die Windmessungen in Balzers wurden von der EMPA (Eidg. Materialprüfungsanstalt in Dübendorf) und die Temperatur- und Feuchtigkeitsregistrierungen in Vaduz, rsp. Schaan von der Landwirtschaftlichen Beratungsstelle des Fürstentums Liechtenstein ausgeführt. Den beiden Stellen sei hier für die freundliche Ueberlassung des Beobachtungsmaterials bestens gedankt.

Grössere Ausfälle der Windregistrierungen von insgesamt je drei Monaten in Landquart und auf Pizalun waren auf instrumentelle Störungen zurückzuführen, welche im schneereicheren Winter 1967/68 bei der Höhenstation durch Frost und starken Schneefall bedingt waren.

3. Föhnhäufigkeiten im Rheintal während der zweijährigen Untersuchungsperiode (Juli 1967 bis Juni 1968)

Die Auswertung des Beobachtungsmaterials der im Raume Landquart - Bad Ragaz - Buchs liegenden Messstationen zeigte schon bald, dass zwischen den einzelnen Orten starke Unterschiede in der Föhnhäufigkeit herrschen. Die speziell bearbeitete Meteorologische Station Bad Ragaz ist daher keineswegs repräsentativ für einen grösseren Abschnitt des Rheintales, tritt doch der Föhn beispielsweise im benachbarten Landquart deutlich weniger oft auf. Tabelle 12 zeigt eine Zusammenstellung der absoluten Föhnhäufigkeiten jener Beobachtungsorte, für welche aufgrund registrierender Instrumente (Windmesser, Thermo- und Hygrographen) eine genauere Bestimmung der Föhndauer möglich war. Die Unterteilung in verschiedene Zeitabschnitte dient der Wiedergabe der zeitlichen Schwankungen.

Werden die halbjährlichen Föhnsummen der Stationen Bad Ragaz und Altdorf mit den dreissigjährigen Erwartungswerten verglichen, so zeigt sich, dass die föhnarmen zweiten Jahreshälften 1967 und 1968 (10 bis 40 % Defizit) 15 bis 40 % übernormalen föhnreichen ersten Jahresteilten gegenüberstehen. Gesamthaft war 1968 die Föhnhäufigkeit in Bad Ragaz mit 849 Stunden (Mittel 1939-68: 809 Std.) leicht übernormal, während in Altdorf mit 443 Stunden das Mittel 1939-68 von 454 Std. nicht ganz erreicht wurde.

Wie aus der Zusammenstellung (Tabelle 12) hervorgeht, herrschte nördlich des Fläscherbergs, zwischen Balzers und der Luziensteig, durchschnittlich etwas länger Föhn als in Bad Ragaz. Talabwärts nimmt jedoch die Föhnhäufigkeit rasch ab. So tritt im Gebiet von Vaduz - Buchs - Schaan der Föhn nur noch halb so oft auf. Erstaunlicherweise wurde auch im talaufwärts gelegenen Landquart eine, verglichen mit Bad Ragaz um etwa 30 Prozent geringere Föhn-dauer gemessen. Dies zeigt, dass sich die Station Bad Ragaz an einer Stelle des Rheintales befindet, welche leicht auf Föhn anspricht und sich deshalb für Föhnuntersuchungen gut eignet.

Die Windregistrierungen der beiden Höhenstationen (Fläscherberg 940 m und Pizalun 1458 m) ermöglichten erstmals eine über einen längeren Zeitraum andauernde Beurteilung der Föhnströmungsverhältnisse in mittleren Höhenlagen über dem Tal. Eine Abgrenzung des Föhns

Tabelle 12 Föhndauer (Anzahl Stunden mit Föhn) im Rheintal zwischen Landquart und Buchs (zum Vergleich sind die entsprechenden Werte für Altdorf mitaufgeführt).
Untersuchungsperiode: Juli 1967 - Juni 1969; die Prozentzahlen beziehen sich auf die Werte von Bad Ragaz.

- * Messungen bis Ende März 1968 in Vaduz, anschliessend in Schaan
** Die aufgetretenen Unterbrüche bei den Windregistrierungen wurden durch Interpolation ergänzt.

Ort	1967		1968		1969		Mittel pro Jahr	
	Juli - Dez.	%	Jan. - Dez.	%	Jan. - Juni	%		
	h		h		h		h	%
<u>Talstationen:</u>								
Bad Ragaz	201	100	849	100	560	100	805	100
Vaduz/Schaan*	125	62	290	34	252	45	333	41
Buchs SG	132	66	390	46	325	58	423	52
Balzers**	-	-	ca. 900	106	-	-	-	-
Landquart**	ca. 150	75	ca. 550	65	ca. 420	75	ca. 560	70
<u>Höhenstationen:</u>								
Fläscherberg	ca. 500	250	ca. 1600	190	ca. 1000	180	ca. 1550	190
Pizalun	ca. 550	275	ca. 1900	225	ca. 1050	190	ca. 1750	215
<u>Vergleichsstation (Reusstal):</u>								
Altdorf	155	77	443	52	384	68	491	61

von den übrigen Südwinden stösst hier jedoch auf Schwierigkeiten. Die für Tallagen bekannten Föhnauswirkungen auf Temperatur- und Feuchtigkeitswerte sind in der Höhe der Station Pizalun (1000 m/Talgrund) nur wenig ausgeprägt oder fehlen teilweise sogar ganz. Die in Tabelle 12 aufgeführten Werte der Höhenstationen stellen daher lediglich eine anhand der Registrierstreifen ermittelte Schätzung dar. In Ermangelung sicherer Grenzkriterien erfolgte für die weiteren Untersuchungen am Beobachtungsmaterial der Höhenstationen eine Beschränkung auf jene Zeitabschnitte, während welchen an Talstationen (Bad Ragaz oder Buchs) Föhn herrschte.

Werden zusätzlich zu den Registrierungen auch die Beobachtungen der Rheintaler Stationen des Klimanetzes beigezogen, so können aufgrund der subjektiv bestimmten Anzahl Beobachtungstermine mit Föhn die Häufigkeitsverhältnisse von Chur bis zum Bodensee abgeschätzt werden.

Ob an einer Station zu einem bestimmten Termin Föhn herrsche, wurde mit Hilfe der in Teil II, Abschnitt 8.1 dieser Arbeit aufgeführten Kriterien bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

Tabelle 13 Anzahl Beobachtungstermine mit Föhn im Rheintal zwischen Bodensee und Chur
Untersuchungsperiode: Juli 1967 - Juni 1969, Die Prozentzahlen beziehen sich auf die Station Bad Ragaz.

Meteorologische Station	1 9 6 8					Mittel pro Jahr (Juli 1967 - Juni 1969)				
	07	13	21 Uhr	total	%	07	13	21 Uhr	total	%
Chur	29	58	46	133	126	30	54	48	132	125
Bad Ragaz (Mittel 1939-68)	28	36	42	106	100	28	35	40	103	100
						(32	36	33	101)	
Sargans	30	53	44	127	120	26	48	40	114	107
Altstätten	2	18	6	26	25	2	14	10	26	25
Heiden	13	21	13	47	44	14	23	16	53	50
Rorschach	1	1	9	11	10	1	2	8	11	10

Deutlich zeichnet sich der generelle Rückgang der Föhnhäufigkeit mit zunehmender Entfernung vom Alpenkamm ab. Dabei nimmt Heiden durch seine Höhenlage (815 m) eine Sonderstellung ein: Es herrscht dort doppelt so häufig Föhn wie im etwas südlicher im Tal gelegenen Altstätten (465 m).

In den verschiedenen Tagesgängen (Verhältnisse der Morgen-, Mittag- und Abendföhntermine) spiegelt sich der Einfluss der örtlichen Reliefgestaltung auf die Föhnhäufigkeit; an den meisten Orten tritt durchschnittlich am Morgen weniger Föhn auf als zu den übrigen Zeiten. Besonders deutlich zeigt sich diese Benachteiligung der Morgenstunden in Landquart. Wie aus dem Kurvenverlauf in Abb 15 hervorgeht, ist in Buchs im Sommer der Föhn am späten Nachmittag sechsmal, in Landquart kurz nach Mittag sogar beinahe siebenmal so häufig wie morgens um sieben Uhr. Während in Buchs im föhnreicheren Winterhalbjahr dieser starke Tagesgang beinahe verschwindet, bleibt er in Landquart in etwas abgeschwächter Form erhalten. Es erstaunt daher nicht, dass hier die totale Föhnhäufigkeit wesentlich unter den Beträgen von Chur und Bad Ragaz zurückbleibt. Vermutlich wird dieser Tagesverlauf durch das Ausfliessen von Kaltluft aus dem Prättigau hervorgerufen. Die schwerere Luft bewirkt in diesem Talabschnitt ein oft nur lokales Abheben der Föhnströmung; in vielen Fällen ist in Chur und Bad Ragaz keine gleichzeitige Föhnpause festzustellen.

Die Föhneinbrüche weisen an den verschiedenen Beobachtungsorten auch unterschiedliche Längen auf. So dauert ein Föhnfall in den zwei untersuchten Jahren im Durchschnitt in Balzers und in Bad Ragaz 15 Stunden, in Buchs 9.5, in Altdorf 10.5 und in Landquart 7.5 Stunden.

MITTLERE WINDSTAERKE BEI FOEHN

TAGESGANG DER STUNDENMITTEL

RELATIVE FOEHNHAEUFIGKEIT

TAGESGANG DER STUNDEN MIT FOEHN

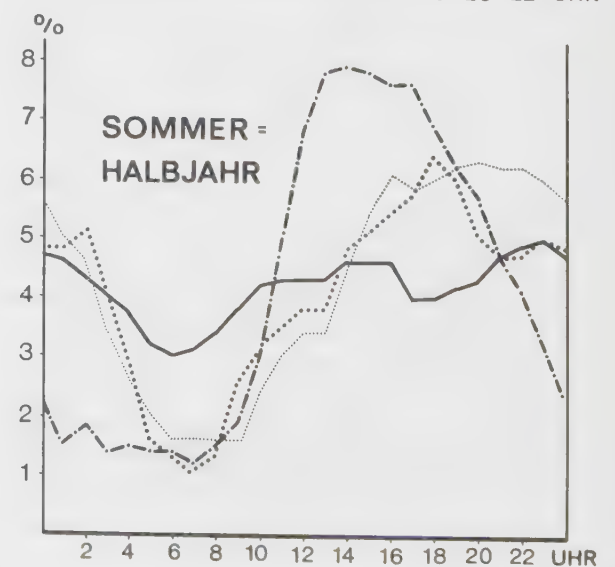
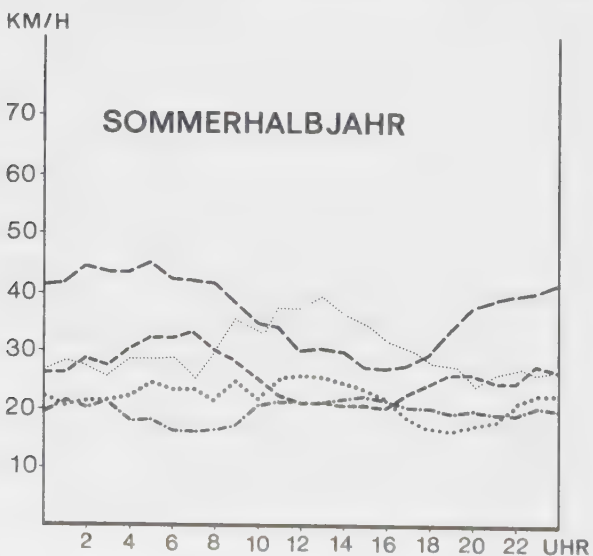
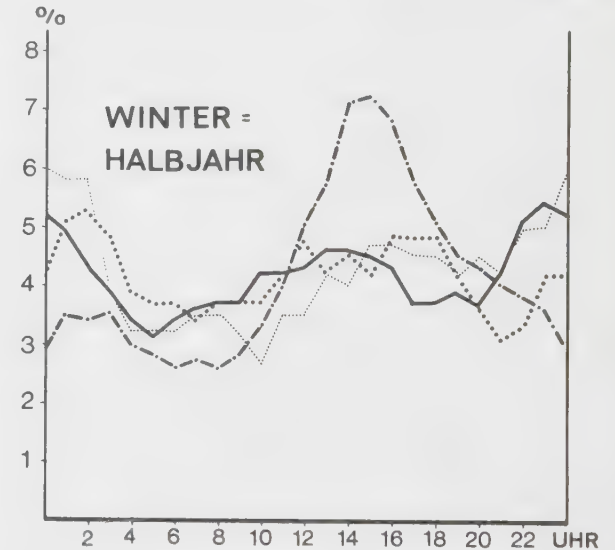
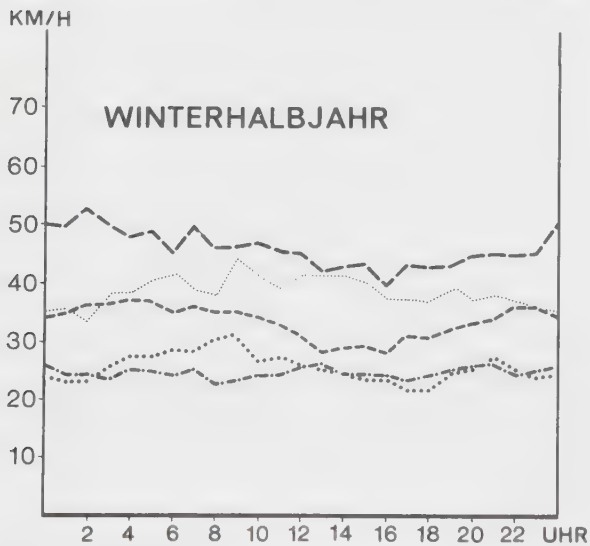
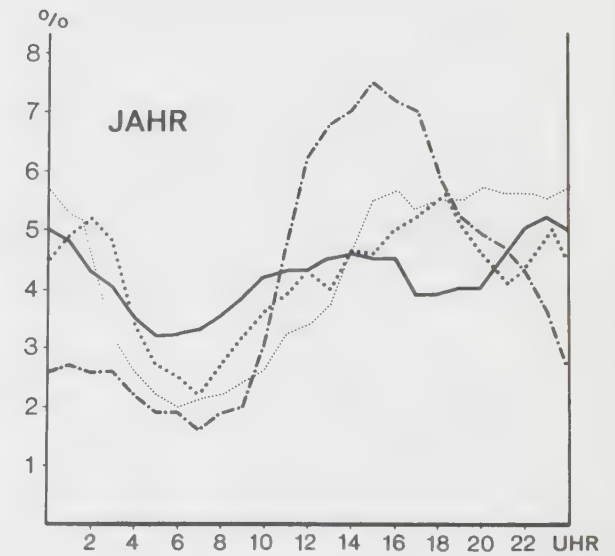
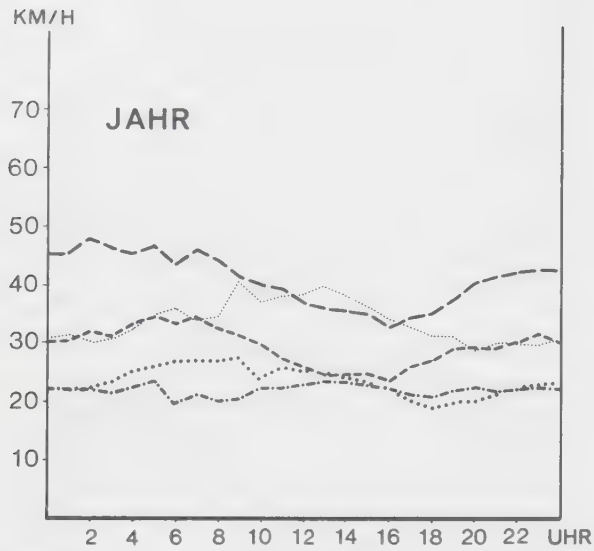


Abb.15
UNTERSUCHUNGSPERIODE : JULI 1967- JUNI 1969
WINTERHALBJAHR : OKTOBER - MAERZ
SOMMERHALBJAHR : APRIL - SEPTEMBER

----- PIZALUN
----- FLAESCHERBERG
-.-.-.- LANDQUART
———— BAD RAGAZ
..... BUCHS
..... ALT DORF

Tabelle 14 Häufigkeit der Föhnvorkommen in Abhängigkeit von ihrer Dauer während der zweijährigen Untersuchungsperiode (Juli 1967 - Juni 1969)
*zu niedriger Wert infolge instrumenteller Störungen (Ausfall des Windmessers über insgesamt 3 Monate).

Ort \ Dauer	Relative Häufigkeit (%) der Föhnvorkommen							Total Fälle
	<2h	2- <6h	6- <12h	12- <18h	18- <24h	24- <48h	>48h	
Landquart	9	42	31	13	3	2	0	(124)*
Bad Ragaz	8	26	25	10	7	21	3	108
Buchs	18	28	26	19	2	5	2	89
Altdorf	16	26	25	21	3	8	1	93

Aus Tabelle 14 ist zu entnehmen, dass sich einerseits Bad Ragaz durch eine grössere Zahl langer Föhnfälle von ein bis zwei Tagen Dauer, Landquart dagegen durch viele kurze zwei- bis sechsstündige Föhnvorkommen erheblich von den übrigen Stationen unterscheidet. Dagegen sind die Verteilungen für Buchs und Altdorf im wesentlichen gleich. Hier dauert im Mittel nur jeder zehnte Föhnfall länger als 18 Stunden, während in Bad Ragaz jeder dritte (=15 bis 20 Fälle pro Jahr) diesen Grenzwert überschreitet.

4. Windverhältnisse

4.1. Windrichtung

Die infolge der Talrichtung im allgemeinen südsüdöstliche mittlere Windrichtung bei Föhn (Abb. 16) wird an den mit Windregistriergeräten (Typ Woelfle) ausgerüsteten fünf Stationen im Untersuchungsgebiet durch die örtlichen Verhältnisse teilweise verändert. Von den drei Talstationen fällt nur in Balzers die Hauptrichtung im wesentlichen mit der Talachse zusammen. In Landquart und kleinräumiger in Buchs wird die Föhnströmung an talaufwärts gelegenen Berghängen reflektiert und erhält dadurch im ersten Fall eine östliche, in Buchs dagegen eine leicht westliche Richtungskomponente.

Derselbe Effekt ist auf dem Fläscherberg zu beobachten. Hier erfolgt die Ablenkung von SSE auf SE durch die nach Südwesten abfallende Felswand des die Messstation überragenden Hauptgipfels. Die beste Uebereinstimmung der Föhnrichtung mit der Talachse finden wir auf dem Pizalun (Föhnrichtung = 160°).

4.2. Windstärke

Auch bei den Föhnstärken sind die lokalen Verhältnisse von ausschlaggebender Bedeutung. Hindernisse, welche entweder den Talquerschnitt merklich verkleinern oder spezielle Umströmungsverhältnisse schaffen, können Geschwindigkeiten hervorrufen, welche wesentlich über denjenigen von Höhenstationen liegen. So wurde in Balzers (Tallage), wie aus Tabelle 15 hervorgeht, eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit gemessen als auf dem 1000 m höher gelegenen Pizalun.

RELATIVE HAEUFIGKEIT DER WINDRICHTUNGEN BEI FOEHN

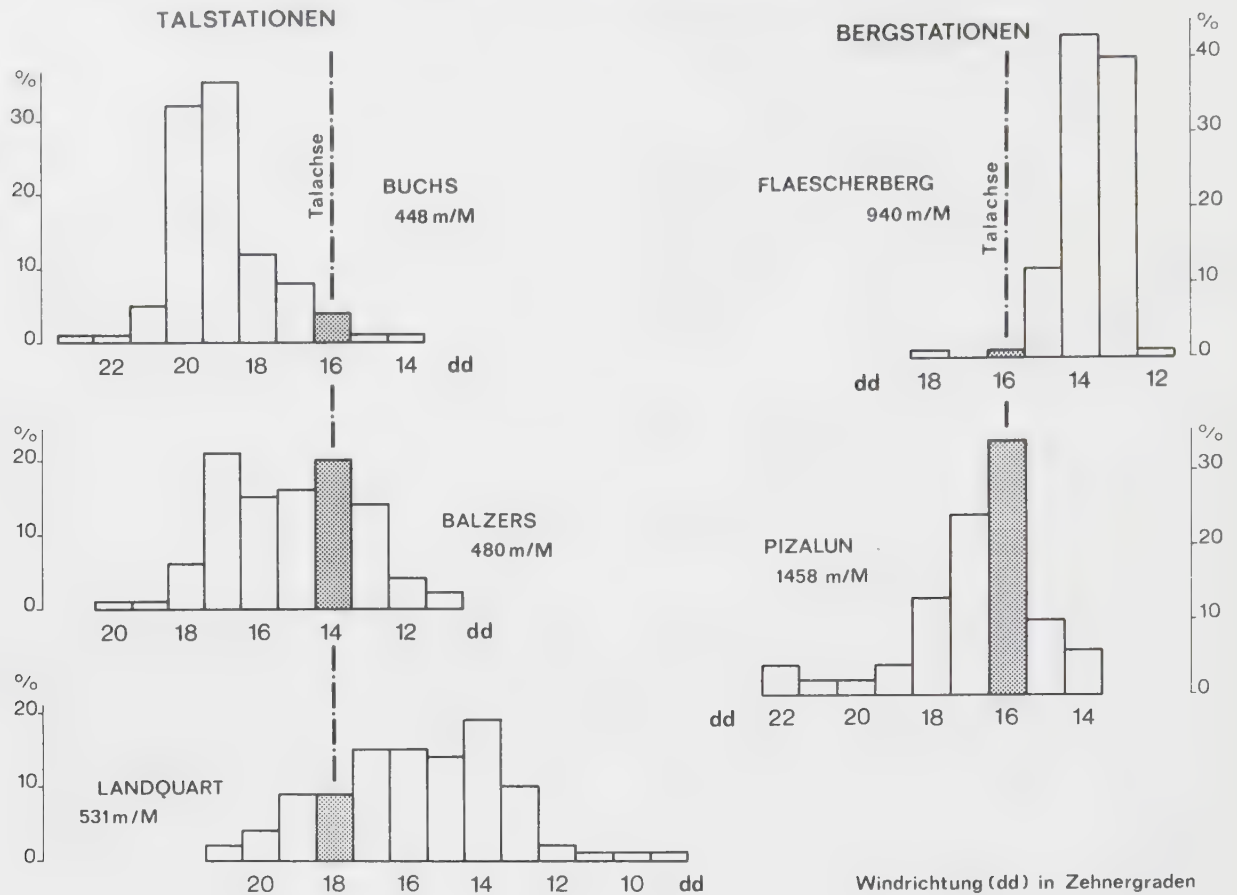


Abb. 16 Verteilung der mittleren stündlichen Windrichtungen bei Föhn im Rheintal.
Untersuchungsperiode: Juli 1967 - Juni 1969.

Tabelle 15 Durchschnittliche Stundenmittel der Windstärke (Windweg in km/h) bei Föhn im Rheintal.
Untersuchungsperiode: Juli 1967 - Juni 1969
Sommerhalbjahr: April - September Winterhalbjahr: Oktober - März
*ausserhalb der Untersuchungsperiode: 54 km/h (21. 2. 66, 06. 00 h)

Ort	Mittlere Windstärke (km/h)			Maximales Stundenmittel (Datum, Zeit) km/h
	Sommer	Winter	Jahr	
Talstationen:				
Landquart	20	24	22	46* (3. 11. 1968, 04. 00h)
Balzers	-	-	31	85 (18. 2. 1969, 23. 00h)
Buchs	21	25	23	51 (7. 1. 1968, 08. 00h)
Höhenstationen: (bei Föhn in Bad Ragaz)				
Fläschberg (940 m)	36	46	41	85 (18. 2. 1969, 23. 00h)
Pizalun (1458 m)	25	33	29	61 (19. 2. 1969, 24. 00h)

Eine noch stärkere Erhöhung der Geschwindigkeit wird auf dem Fläscherberg durch die in Abschnitt 4.1 bereits erwähnte Reflexion bewirkt.

Diese Einflüsse des Reliefs wirken sich sowohl auf die Durchschnittswerte als auch auf die maximalen Stundenmittel aus, sodass auch bei den einzelnen Böenspitzen mit starken örtlichen Unterschieden zu rechnen ist.

Da im Untersuchungsgebiet kein Windmesser mit Böenregistrierung zum Einsatz gelangte, wurden in dieser Hinsicht die Daten der Station Altdorf für das Jahr 1968 untersucht. In den 54 Föhnvorkommen fiel dabei in 29 Fällen (= 54 %) die Spitzenböe in die Stunde mit maximalem Stundenmittel. Der Böenfaktor B_f (nach EKHART⁶ : $B_f = V_{\max} / V_{\text{mittel}}$; in unserem Falle die Geschwindigkeit der stärksten Böe innerhalb der Stunde mit maximalem Stundenmittel im Verhältnis zu diesem Stundenmittel) betrug im Durchschnitt aller 54 Fälle 2.0. Er schwankte im wesentlichen zwischen 1.6 und 2.3, wobei die Böenfaktoren bei höheren Stundenmittelwerten (über 30 km/h) mehrheitlich unter, in den übrigen Fällen über dem Durchschnitt lagen. Erwartungsgemäss fiel der Böenfaktor bezogen auf das mittlere Stundenmittel der ganzen Föhnperiode mit im Durchschnitt 2.6 (Schwankungsbreite ohne Extremwerte 2.0 bis 3.2) höher aus. Vergleichende Untersuchungen über das Verhältnis des maximalen Stundenmittels zum mittleren Stundenmittel einer Föhnperiode (Messungen aus dem Rhein- und Reusstal) weisen darauf hin, dass im Rheintal ähnliche Böigkeitsverhältnisse wie in Altdorf angenommen werden können.

Im weiteren wurde der mittlere Tagesgang der stündlichen Windgeschwindigkeiten bei Föhn untersucht (Abb. 15 links). Dabei zeigte sich bei den Höhenstationen (besonders deutlich im Sommerhalbjahr), dass sich hier die in dieser Jahreszeit an Strahlungstagen kräftig auftretenden Talwinde auch bei Föhn bemerkbar machen. Je nach Ausbildungsstärke der Föhnlage führt diese Lokalzirkulation in den frühen Nachmittagsstunden zu einem Föhnunterbruch oder aber sie schwächt die Südströmung zumindest erheblich ab. Die grösste Wirkung dieser Ueberlagerung der beiden einander entgegengesetzten Kräfte ist auf dem Fläscherberg zu erkennen. Im Gegensatz dazu ist gleichzeitig bei den Talstationen im Mittel eine allerdings nur leichte, Geschwindigkeitszunahme festzustellen. Diese Zunahme ist nach den Ergebnissen von MAEDER²¹ in Altdorf wesentlich ausgeprägter, indem dort ein starkes Geschwindigkeitsmaximum am Nachmittag auftritt. Zum Vergleich ist zusätzlich zu den Rheintaler Stationen auch der für die aktuelle Untersuchungsperiode gültige Kurvenverlauf von Altdorf in die Darstellung aufgenommen worden (fein punktierte Linie, Abb. 15 links unten).

Im übrigen sind die mittleren täglichen Schwankungen im Rheintal nicht bedeutend. Erst die Untersuchung einer längeren Periode wird zeigen, ob die beobachteten Unterschiede als gesichert angesehen werden können.

Im Gegensatz zum Verlauf der mittleren Föhngeschwindigkeiten in der Höhe sei nachfolgend an einem Einzelfall gezeigt, dass umgekehrt im Tal auch eine vorübergehende Verdrängung des Talwindes durch den Föhn möglich ist. Während der Endphase einer Antizyklonallage, welche häufig eine Föhnlage einleitet, bildet sich der Talwind im Sommer trotz der in der Höhe bereits herrschenden Südwestwinde noch bis zum Pizalun hinauf aus. Allerdings wird er hier meist nach wenigen Stunden wieder durch südliche Winde abgelöst, während er im Normalfall in den Monaten Mai bis Juli bis gegen Mitternacht andauert. Vermag der Föhn, was in dieser Jahreszeit selten ist, bis in die Niederungen vorzudringen, so geschieht der Windwechsel im Tal rasch. Ein in dieser Hinsicht besonders schönes Beispiel liefern die Windverhältnisse des 13. Juni 1966 in Landquart (Abb. 17): Der normal ausgebildete Talwind wird um 16 Uhr durch einen Föhneinbruch verdrängt, weht jedoch nach dem Abheben der Föhnströmung um 19 Uhr ohne merklichen Unterbruch in unverminderter Stärke weiter. Dabei ist der Luftmassenunterschied zwischen Talwind und Föhn in Bezug auf Temperatur und relative Feuchtigkeit nur gering, sodass ein Miteinbezug von Föhnluft in das Talwindssystem (vor dem eigentlichen Durchbruch bis zum Talgrund) nicht ausgeschlossen werden kann.

08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Uhr
17	16	13	00	35	34	32	32	32	18	17	18	36	06	05	00	18	dd
3	3	3	2	5	8	17	14	10	23	26	20	19	12	8	4	4	ff(km/h)

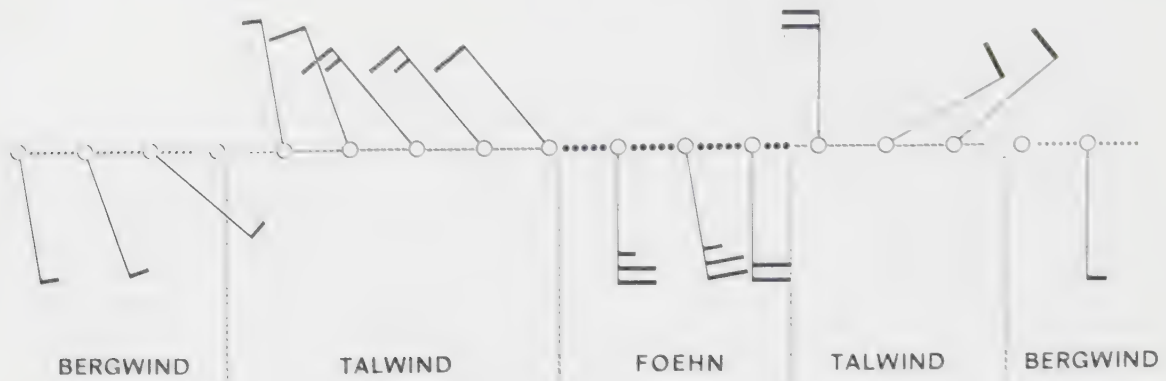


Abb. 17 Föhndurchbruch an einem Frühsommertag (13. Juni 1966) mit normal ausgebildetem Berg-/Talwindssystem in Landquart.
Beide Windwechsel (Einbruch und Abheben der Föhnströmung) erfolgen ohne längere windschwache Uebergangsphase.

Um die gegenseitige Abhängigkeit der Föhnstärken an verschiedenen Messorten beurteilen zu können, wurden für die interessierenden Stationspaare die Korrelationen berechnet. Da bei den Geschwindigkeiten keine Linearität vorausgesetzt werden kann, ist die Rangkorrelation mit Hilfe des Tau-Koeffizienten von KENDALL (vgl. HASELOFF-HOFFMANN¹⁴, p. 120f) bestimmt worden. In Tabelle 16 sind die Resultate zusammengestellt. Hohe Korrelationen ergeben sich für die Stationspaare Fläscherberg-Balzers (Entfernung 1 km, Höhendifferenz 460 m) sowie Fläscherberg-Buchs (Entfernung 6.2 km, Höhendifferenz 490 m), während der Zusammenhang zwischen den beiden Höhenstationen Pizalun und Fläscherberg (Entfernung 8.5 km, Höhendifferenz 520 m) nicht mehr besonders stark ist. Voraussetzung für die ersterwähnten hohen Korrelationen ist ein Vergleich gleich langer Föhnperioden. Wird hingegen die mittlere Geschwindigkeit auf dem Fläscherberg für den Zeitraum, während welchem in Buchs Föhn herrscht mit derjenigen der meist bedeutend längeren Periode in Balzers verglichen, so stellen wir eine Abnahme des Tau-Koeffizienten von 0.84 auf 0.61 fest.

Bei den Talstationen wurden grundsätzlich die mittleren Stärken der an den einzelnen Orten ungleich langen Föhnperioden verglichen. Die niedrigen Korrelationswerte weisen darauf hin, dass mehrheitlich die Geschwindigkeitsschwankungen innerhalb einer Föhnperiode die Stärkeunterschiede zwischen verschiedenen Föhnfällen übertreffen. Eine zuverlässige Schätzung der mittleren Geschwindigkeit ist daher nur für jene Orte möglich, von welchen die Dauer des Föhnvorkommens bekannt ist.

Aus den niedrigen Korrelationswerten des Pizalun muss gefolgert werden, dass jene Verhältnisse weder für den Fläscherberg noch für die Talstation als allgemein repräsentativ angesehen werden können. Die den Pizalun bei Föhn berührenden Strömungslinien scheinen im Gegensatz zu denjenigen des Fläscherbergs im nördlichen anschliessenden Raum bis Buchs nicht immer mit dem Talgrund in Berührung zu gelangen. Werden für Pizalun und Buchs nur Föhnfälle ausgewählt, bei welchen der vertikale Temperaturgradient zwischen diesen beiden Stationen 0.9 Grad pro 100 Meter oder mehr beträgt, so erhöht sich der Taukoeffizient auf 0.81. In diesen speziellen Fällen dürfte daher auch zwischen Pizalun und Buchs ein deutlicher Zusammenhang bestehen.

Tabelle 16 Rangkorrelationen (Tau-Koeffizient von KENDALL) der mittleren Windgeschwindigkeit von Föhnperioden verschiedener Stationspaare im Rheintal (zum Vergleich ist auch Altdorf miteinbezogen).
Es wurden je 16 gemeinsame Föhnfälle aus dem Zeitraum Juli 1967 - Juni 1969 untersucht.

- 1 Signifikanz : $p < 0.001$
2 Signifikanz : $p < 0.05$
* in einem zweiten Beispiel (andere Föhnfälle): 0.82

Stationspaare	Buchs	Landquart	Balzers	Fläscherberg (bei Föhn in Buchs)	Fläscherberg (bei Föhn in Balzers)	Pizalun (bei Föhn in Buchs)
Altdorf	0.44	0.59				
Buchs		0.38 ²	0.40	0.73*		0.45
Landquart			0.54			
Balzers				0.61	0.84 ¹	
Fläscherberg (bei Föhn in Buchs)						0.60

5. Temperatur

Aus einem Vergleich der Temperaturverhältnisse geht hervor, dass die föhnbedingten Temperaturüberschüsse mit zunehmender Entfernung vom Alpenkamm ansteigen (Tabelle 17).

Stationen		Anzahl Beobachtungstermine mit Föhn an beiden Stationen				Mittlere Temperaturdifferenzen (A - B) °C
A	B	07h	13h	21h	total	
Bad Ragaz	Chur	44	67	68	179	0.9
Bad Ragaz	Sargans	41	64	68	173	- 0.1
Bad Ragaz	Buchs	21	35	36	92	- 2.0
Bad Ragaz	Altstätten	5	23	18	46	- 1.6
Bad Ragaz	Rorschach	1	2	8	11	- 2.1
Bad Ragaz	Altdorf	21	43	48	112	- 1.6
Chur	Altdorf	19	43	43	105	- 2.5
Pizalun	Rigi	20	42	47	109	0.1
(bei Föhn in Bad Ragaz und Altdorf)						
Pizalun	Bad Ragaz	41	65	69	175	- 6.8
(bei Föhn in Bad Ragaz)						
Pizalun	Heiden	19	32	31	82	- 5.4
(bei Föhn in Bad Ragaz und Heiden)						

Tabelle 17 Temperaturdifferenzen zwischen verschiedenen Beobachtungsstationen bei Föhn (Untersuchungsperiode: Juli 1967 - Juni 1969).

Nachfolgend soll auf einige Stationspaare eingegangen werden:

Bad Ragaz - Chur

Bei einer Höhendifferenz von 76 Metern sind 0.5 Grad der mittleren Temperaturdifferenz von 0.9 Grad durch die Höhenlage bedingt, sodass der durch den Föhn effektiv hervorgerufene Temperaturüberschuss in Bad Ragaz 0.4 Grad Celsius beträgt. Am Morgen (0730 Uhr Termine allein) liegt der entsprechende Wert jedoch bei 0.9 Grad, was auf einen höheren Anteil an Kaltluft zurückzuführen ist.

Bad Ragaz - Sargans

Aufgrund der kleinen Distanz von knapp vier Kilometern, welche die beiden Beobachtungsstationen voneinander trennt, sind keine grossen Temperaturunterschiede zu erwarten. Tatsächlich ist es in Sargans im Durchschnitt bei Föhn weniger als ein Zehntel Grad wärmer als in Bad Ragaz. Die Häufigkeitsverteilung (Abb. 18 a) der einzelnen Temperaturunterschiede zeigt eine gute Näherung an eine Normalverteilung (Sicherheitsgrenze des Chi-Quadrattests: $p = 0.35$). Die Abweichungen

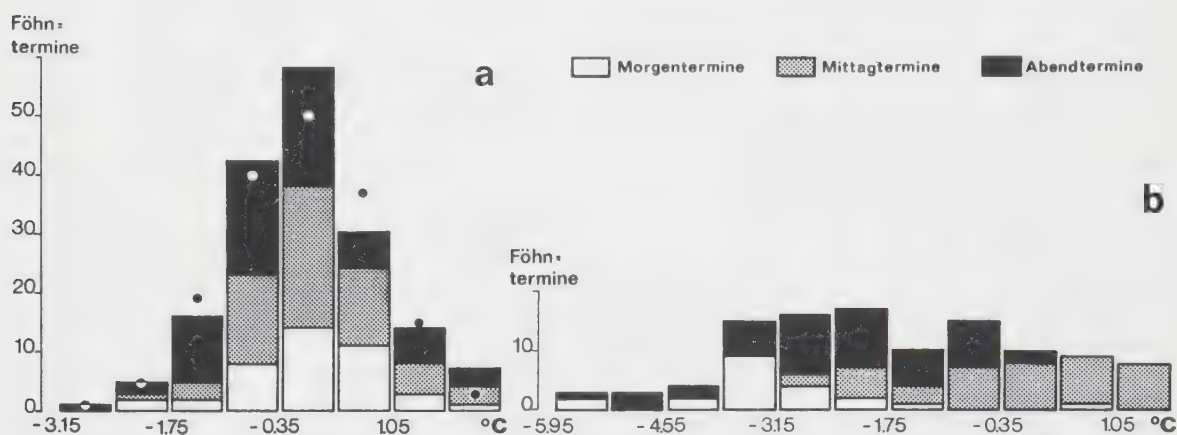


Abb. 18 Absolute Häufigkeitsverteilung der Temperaturdifferenzen bei Föhn (Untersuchungsperiode Juli 1967 - Juni 1969).

- a Bad Ragaz - Sargans (total 173 Föhntermine)
Die Temperaturunterschiede sind angenähert normal verteilt (die Punkte markieren die bei einer theoretischen Normalverteilung zu erwartenden Klassenhäufigkeiten);
Sicherheitsgrenze des Chi-Quadrattests: $p = 0.35$.
- b Bad Ragaz - Altdorf (total 112 Termine)
Deutliche Trennung der Morgen- und Abendtermine mit negativer Temperaturdifferenz von den weitgehend ausgeglichenen Mittagsterminen.

können daher als zufällig betrachtet werden. Den mittleren Terminunterschieden von + 0.1 Grad am Morgen und Mittag und von - 0.3 Grad am Abend ist zu entnehmen, dass es abends im süd-exponierten Sargans etwas wärmer ist, was nicht mit dem Föhn im Zusammenhang stehen dürfte.

Bad Ragaz - Buchs

Ein interessantes Ergebnis liefert der Temperaturvergleich dieser beiden Stationen. Aus den mittleren Termindifferenzen von - 3.3 Grad um 0730 Uhr, - 1.1 Grad um 1330 Uhr und - 2.2 Grad um 2130 Uhr lässt sich ein gewogenes Gesamtmittel von - 2.0 Grad berechnen. Bei Föhn ist es also in Buchs immer deutlich wärmer, wobei der Unterschied am Morgen am grössten ausfällt. Daraus muss gefolgert werden, dass die Mischföhnluft in Bad Ragaz, welche offensichtlich noch einen merklichen Anteil an Kaltluft enthält, grösstenteils durch das Seetal nach Westen abfließt,

während im Rheintal unterhalb Sargans wärmere Luft aus der Höhe zugeführt wird.

Aehnliche Temperaturverhältnisse wie in Buchs sind auch an den weiter nördlich gelegenen Stationen Altstätten und Rorschach festzustellen.

Bad Ragaz - Altdorf

Bei durchschnittlich ausgeglichenen Temperaturen am Mittag ist es in Altdorf am Morgen 3.2 Grad und am Abend 2.4 Grad wärmer, was einen mittleren Ueberschuss von 1.6 Grad ergibt. Diese Unterschiede zwischen den verschiedenen Terminen kommen im Histogramm (Abb. 18 b) klar zum Ausdruck. Auch bei diesem Vergleich wirkt sich der Kaltluftanteil am Morgen und Abend im betreffenden Abschnitt des Rheintales zu Ungunsten der Föhntemperaturen von Bad Ragaz aus.

Pizalun - Buchs (- Bad Ragaz)

Von 19 Morgen-, 32 Mittag- und 34 Abendterminen wurden die mittleren vertikalen Temperaturgradienten bei Föhn zwischen der Bergstation Pizalun (1458 m) und den Talstationen Buchs (449 m) und Bad Ragaz (510 m) berechnet:

	Mittlerer vertikaler Temperaturgradient bei Föhn (Grad Celsius / 100 Meter)			
	0730 h	1330 h	2130 h	Gesamtmittel
Pizalun - Buchs	1.02	0.93	0.87	0.93
Pizalun - Bad Ragaz	0.73	0.86	0.69	0.76

Der Kaltluftanteil (hauptsächlich am Morgen und Abend) in Bad Ragaz wirkt sich ebenfalls auf die vertikalen Temperaturgradienten aus.

Untersucht man die Gradienten einzelner Föhnlagen, so lassen sich für die Stationen Pizalun und Buchs Fälle mit trockenadiabatischem Gradienten (um 1°C/100 m) und solche mit einer Temperaturabnahme von nur 0.8°C pro 100 Meter unterscheiden. Es muss daraus geschlossen werden, dass der Strömungsverlauf bei Föhn nicht immer derselbe ist, worauf, wie bereits erwähnt, auch Windstärkekorrelationen zwischen den beiden Orten hinweisen.

Pizalun - Gütsch ob Andermatt

Um grössenordnungsmässig den vertikalen Temperaturgradienten über dem Pizalun abschätzen zu können, wurden im weiteren die Temperaturen mit denjenigen der auf einer Höhe von 2284 m über Meer liegenden Synoptischen Station Gütsch verglichen. Es ergaben sich folgende Werte:

	Mittlerer vertikaler Temperaturgradient bei Föhn (Grad Celsius / 100 Meter)			
	0730 h	1330 h	2130 h	Gesamtmittel
Pizalun - Gütsch	- 0.93	- 1.26	- 1.02	- 1.09

Da die Station Gütsch in den meisten Fällen bei Föhn stark bewölkten bis bedeckten Himmel zu verzeichnen hat, erhält der Pizalun dank der in jenem Gebiet sich auswirkenden föhnigen Aufhellungen tagsüber zusätzliche Strahlungswärme. Dadurch ergibt sich für den Mittagstermin ein scheinbar überadiabatischer Temperaturgradient, welcher jedoch keine grossräumige Bedeutung hat. Die Morgen- und Abendwerte weisen darauf hin, dass ohne diesen Strahlungsanteil recht gute Näherungen an einen trockenadiabatischen Temperaturgradienten erreicht werden, trotzdem die beiden Stationen nicht auf derselben Strömungslinie liegen dürften.

Zusammenfassend folgt aus den Temperaturuntersuchungen, dass die bodennahe Föhnströmung im Rheintal unterhalb Chur einen am Morgen und Abend erheblichen Anteil an aus den Bündnertälern stammender Kaltluft enthält. Diese kältere Föhnmischluft fliesst hauptsächlich durch das Seetal ab. Ueber dieser Talströmung von vermutlich nur geringer Mächtigkeit herrschen bei Föhn näherungsweise trockenadiabatische Verhältnisse, welche sich im St. Galler Rheintal unterhalb Sargans häufig bis zum Talgrund durchsetzen.

6. Relative Feuchtigkeit

Die mittleren relativen Feuchtigkeiten der Talstationen bei Föhn liefern keine bedeutsamen neuen Erkenntnisse. In der zweijährigen Untersuchungsperiode war die Luft durchschnittlich bei Föhn in Altdorf 12 Prozent trockener als in Bad Ragaz (fünfzehnjähriges Mittel +11 Prozent). Auch in Vaduz wurden bei Föhn durchschnittlich 10 Prozent niedrigere Feuchtigkeitswerte gemessen, während bei allen übrigen Talstationsvergleichen die Differenzen innerhalb der beträchtlichen Ungenauigkeit der Messinstrumente (Haarhygrometer) lagen.

Interessante Ergebnisse liefert dagegen eine Untersuchung der Feuchtigkeiten der Bergstationen Pizalun und Säntis bei Föhn in Bad Ragaz und Sargans (Tabelle 18). Auf dem Säntis (2500 m) lag die relative Feuchtigkeit nur in 28 Fällen (= 16 %) unter 50 Prozent, während in 111 Fällen (= 63 %) Werte von 70 Prozent und mehr verzeichnet wurden. Daraus folgt, dass hier die eigentliche Föhnströmung mehrheitlich weniger als 2000 Meter mächtig ist. Der Säntisgipfel liegt bei Föhn häufig in einer Höhenströmung, welche keine oder zumindest nur noch geringe Föhneigenschaften aufweist.

Tabelle 18 Relative Feuchtigkeit (%) auf dem Pizalun (1458 m) und auf dem Säntis (2500 m) bei gleichzeitigem Föhn in Bad Ragaz und Sargans
162 (Pizalun) und 175 (Säntis) Föhntermine der Beobachtungsperiode Juli 1967 bis Juni 1969.

Stationen	Anzahl Beobachtungstermine mit einer relativen Feuchtigkeit von				Mittlere Feuchtigkeit %
	20-34 %	35-49 %	50-69 %	70-100 %	
Pizalun:					
7 Uhr	-	4	24	10	62
13 Uhr	5	28	17	9	48
21 Uhr	-	21	28	16	55
Insgesamt	5	53	69	35	54
Säntis:					
7 Uhr	2	8	6	25	70
13 Uhr	2	7	12	44	74
21 Uhr	2	7	18	42	72
Insgesamt	6	22	36	111	72

Der nur halb so hoch über dem Talgrund gelegene Pizalun (1458 m) nimmt eine Mittelstellung ein. Mit einer durchschnittlichen relativen Feuchtigkeit von 54 Prozent ist ein Föhneinfluss meist vorhanden. Auch hier weisen noch 35 Fälle (= 22 %) Feuchtigkeitswerte von mehr als 70 Prozent auf. Auffallend ist bei dieser Station vor allem der ausgeprägte Tagesgang. Die Morgenstermine fallen mit wenig Ausnahmen deutlich feuchter aus. Auch auf dieser Höhe fliesst in den Morgenstunden Kaltluft ab. Während in erster Linie die Temperaturunterschiede zeigten, dass bei Föhn im Tal zur Zeit der Abendbeobachtung (2130 Uhr) bereits wieder ein merklicher Kaltluft-

anteil vorhanden ist, weichen gleichzeitig auf der Höhe des Pizalun die Föhneigenschaften nur wenig von den Mittagsterminen ab. Dies stimmt mit den Berg-/Talwindverhältnissen überein, erfolgt doch der abendliche Windwechsel vom Tal- zum Bergwind im Mittel in den tiefen Lagen im Sommerhalbjahr vor 20 Uhr, auf dem Pizalun dagegen erst nach 23 Uhr.

Dass am Mittag die Lufttrockenheit auf dem Pizalun nicht allein auf den Föhneinfluss zurückzuführen ist, zeigt auch ein Vergleich mit der Station Heiden (811 m). Während am Morgen und Abend im Durchschnitt auf dem Pizalun ein Feuchtigkeitsüberschuss von 12 Prozent beobachtet wird, sind diese Werte am Mittag trotz einer Höhendifferenz von 650 Metern beinahe ausgeglichen. Möglicherweise tritt jedoch diese zusätzliche strahlungsbedingte Abnahme der relativen Feuchtigkeit am Mittag auf dem Pizalun nur in einer verhältnismässig dünnen bodennahen Luftschicht auf.

Die Feuchtigkeitsverhältnisse auf dem Pizalun bei Föhn weisen daher ebenfalls darauf hin, dass sich das regionale Berg-/Talwindssystem bei geeigneten Voraussetzungen auch bei einer Föhnlage in messbarer Stärke ausbildet, sodass die beobachteten Winde aus der Ueberlagerung dieser beiden Kräftefelder hervorgehen.

7. Luftdruckdifferenz Kloten - Locarno

Die negative Luftdruckdifferenz Alpennordseite - Alpensüdseite (Südstau) ist bekanntlich eng mit den Föhnerscheinungen verbunden und wird daher in der Praxis als Föhnkriterium verwendet.

Die Druckgradienten bei Föhnbeginn und -zusammenbruch liefern einen weiteren Hinweis, dass der Föhn im Rheintal rascher bis zum Talboden durchbricht als in Altdorf. Diese mittleren

Tabelle 19 Mittlerer Druckgradient Alpennordseite - Alpensüdseite bei Föhn in Bad Ragaz in den verschiedenen Jahreszeiten.

Mittlere Luftdruckdifferenz Zürich/Kloten - Locarno/Magadino (negative Werte = Südstau) $\Delta \bar{p}$:

$\Delta \bar{p}_E$ = Druckdifferenz bei Föhneinsatz in Bad Ragaz

$\Delta \bar{p}_Z$ = Druckdifferenz bei Föhnzusammenbruch in Bad Ragaz

Untersuchungsperiode Juli 1967 - Dezember 1968:

h_F = Durchschnittliche Anzahl Stunden pro Monat mit Föhn in Bad Ragaz

$h_{\Delta \bar{p}}$ = Durchschnittliche Anzahl Stunden pro Monat mit einer Luftdruck-

differenz $\Delta p < \frac{\Delta \bar{p}_E + \Delta \bar{p}_Z}{2}$

$\frac{h_F}{h_{\Delta \bar{p}}}$ = Prozentualer Anteil der Stunden mit Föhn in Bad Ragaz bezogen auf die totale Anzahl Stunden mit überdurchschnittlichem Südstaugradienten Locarno-Kloten.

Jahreszeit	$\Delta \bar{p}_E$ mb	$\Delta \bar{p}_Z$ mb	h_F Std.	$h_{\Delta \bar{p}}$ Std.	$\frac{h_F}{h_{\Delta \bar{p}}} \cdot 100$ %
Frühling	- 3.2	- 2.9	156	152	102
Sommer	- 3.6	- 2.9	22	38	58
Herbst	- 4.3	- 4.1	51	74	69
Winter	- 4.5	- 4.5	39	56	70

absoluten Druckgradienten (Tabelle 19) liegen für Bad Ragaz im Frühling und Winter ungefähr zwei, im Herbst ein und im Sommer ein halbes Millibar unter den von WIDMER³¹ für Altdorf berechneten Werten, was den durchschnittlich früheren Beginn und die längere Dauer belegt.

Zum Abschluss wurde die totale Anzahl Stunden mit für die betreffende Jahreszeit überdurchschnittlichem Südtaugradienten bestimmt und mit der Anzahl Stunden mit Föhn in Bad Ragaz verglichen. Die Ergebnisse (Tabelle 19 rechts) zeigen nochmals deutlich, dass der Föhn im Rheintal im Frühling am leichtesten bis ins Tal vordringt. Im Sommer ist dagegen zusätzlich zur jahreszeitlich bedingten geringen Häufigkeit ein Durchbruch ins Tal seltener, worauf auch schon STREIFF-BECKER²⁶ für das Linthtal hingewiesen hat.

Die wichtigste Frage, wie weit der Druckgradient Ursache oder Resultat der ins Tal absteigenden Föhnströmung sei, ist noch offen und kann erst aufgrund von Vertikalsondierungen zuverlässig untersucht werden

8. Zusammenfassung

Ueberblicken wir kurz die wichtigsten Ergebnisse, welche die vorliegenden Untersuchungen über die Föhnverhältnisse im Rheintal lieferten.

Auf verhältnismässig kleinem Raum wechseln die Föhnhäufigkeiten beträchtlich. Im Talabschnitt von Chur bis Sargans tritt verglichen mit Altdorf abgesehen von lokalen Ausnahmen (Landquart) beinahe doppelt so oft Föhn auf. Weiter nordwärts ist eine rasche Abnahme festzustellen, sodass bereits das Gebiet Buchs-Vaduz geringfügig hinter Altdorf zurückbleibt.

Im Gegensatz dazu nimmt die Eindeutigkeit der einzelnen Föhneinsätze gegen das Talinnere hin ab. Während unterhalb von Sargans der Temperatursprung, der Rückgang der relativen Feuchtigkeit sowie der Windwechsel bei Föhneinbruch ähnlich sprunghaft wie in Altdorf erfolgen, bewirkt die hauptsächlich nachts und morgens aus den Bündner Tälern ausfliessende Kaltluft (Bergwind) im Raum Bad Ragaz-Chur mehrheitlich einen allmählichen Uebergang von kühl-feuchter zu warm-trockener Föhnluft. Dadurch wird hier die Abgrenzung erschwert. Diese Mischföhnluft dürfte nur wenig mächtig sein und vorwiegend durch das Seetal abfliessen.

Zusätzlich zum erwähnten Bergwindeinfluss zeigt eine deutliche Geschwindigkeitsabnahme der Föhnströmung auf dem Fläscherberg und auf dem Pizalun in den frühen Nachmittagsstunden (Zeit des Talwindes), dass das regionale Berg-/Talwindensystem bei günstigen Strahlungsverhältnissen auch bei Föhn bis in mittlere Höhen hinauf seinen Einfluss ausübt.

Die wärmemässige Begünstigung der Föhntäler ist mit einer mittleren jährlichen Temperaturerhöhung von 0.6 Grad (Februar + 0.9 Grad) nicht gross. In besonders föhnreichen Monaten kann jedoch das Monatsmittel um beinahe drei Grad erhöht werden.

Die maximale Föhnhäufigkeit im Frühling hängt im wesentlichen mit dem jahreszeitlich bedingten zahlreicheren Auftreten von Südwest- und Westlagen zusammen. Zudem zeigt es sich, dass die Föhnströmung infolge der grossen vertikalen Temperaturgradienten in diesen Monaten besonders leicht bis zum Talboden durchzudringen vermag.

Da der Föhn eine dreidimensionale Erscheinung darstellt, sind die ausschliesslich aus Beobachtungen und Messungen von Bodenstationen gezogenen Strömungsannahmen für mittlere Höhen recht spekulativ. Diese Arbeitshypothesen sollten durch Vertikalmessungen (Radiosondenaufstiege) überprüft werden. Es bleibt daher zu hoffen, dass der schon von verschiedenster Seite seit Jahren geäusserte Wunsch nach einer Radiosondenstation im Innern der Schweizer Alpen in nicht allzuweiter Ferne in Erfüllung gehen wird.

Literaturverzeichnis

- 1 ALAKA M. A. The airflow over mountains
Technical note No. 34, WMO-No. 98. TP. 43. 135 p,
Geneva 1960
- 2 BILLWILLER R., Das Klima der Schweiz. Band 1
MAURER J., Huber & Co., 302 S., Frauenfeld 1909
HESS C.
- 3 BOUËT M. Sur le foehn dans la vallée du Rhône en Suisse
Météorologie 4 (63), p. 309-313, Paris 1961
- 4 BOUËT M. Le foehn à Sierre
Bull. Murithienne, Soc. Valais. sc. nat. 81, p. 1-13, Sion 1964
- 5 COOLEY W. W. Multivariate procedures for the behavioral sciences
LOHNES P. R. John Wiley & Sons, Inc., 211 p., New York 1966
- 6 EKHART E. Zum Innsbrucker Föhn
Met. Rundschau, 2. Jg., Heft 9/10, S. 276-280, Berlin 1949
- 7 ESSENWANGER O. Probleme der Windstatistik
Met. Rundschau 12. Jg., Heft 2, S. 37-47, Berlin 1959
- 8 FELKEL H. Untersuchung über das Druck- und Temperaturfeld sowie die
Vertikalgeschwindigkeit in der freien Atmosphäre bei Südföhn
über den Alpen.
Diss., Scriptum, Oesterreichische Nationalbibliothek, Wien 1967
- 9 FREY K. Beiträge zur Entwicklung des Föhns und Untersuchungen über
Hochnebel
Diss., Rentsch Söhne, 119 S., Trimbach-Olten 1945
- 10 FREY K. Der Dimmerföhn vom 18. Dezember 1945
Geof. Pura e Appl. 17. p. 167-182, Milano 1950
- 11 FREY K. Die Entwicklung des Süd- und des Nordföhns
Archiv Met. Geoph. Biokl. A5, S. 432-477, Wien 1953
- 12 FREY K. Zur Diagnose des Föhns
Met. Rundschau, 10 Jg., Heft 6, S. 181-185, Berlin 1957
- 13 GUELLER A. Ueber Windrichtung und Windstärken in den Alpen
Schweizer Aero Revue, Jg. 30, Nr. 11, S. 394-398, Bern 1955
- 14 HASELOFF O. W. Kleines Lehrbuch der Statistik
HOFFMANN H. J. Walter de Gruyter & Co., 320 S., Berlin 1968
- 15 KOCH H. G. Zum Begriff des Mittelgebirgsföhns
Zeitschrift für Meteorologie, Band 14, Heft 2, S. 29-46,
Berlin 1960
- 16 KOEPPEN W., Handbuch der Klimatologie, Band 1
GEIGER R. Die klimatologischen Elemente und ihre Abhängigkeit von terrest-
rischen Einflüssen
Gebr. Borntraeger, 556 S., Berlin 1936

- 17 KREYSZIG E. Statistische Methoden und ihre Anwendungen
Vandenhoeck & Ruprecht, 422 S., Goettingen 1967
- 18 KUETTNER J. The rotor flow in the lee of mountains
Schweizer Aero Revue, Jg. 33, Nr. 4, S. 208-215, Bern 1958
- 19 KUHN W. Bemerkungen zu K. Freys Föhntheorie
Experientia, Vol. 111/10, 5 S., Basel 1947
- 20 LINDER A. Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und
Ingenieure
Birkhäuser, 484 S., Basel 1964
- 21 MAEDER F. Untersuchung über die Windverhältnisse in Bodennähe bei ver-
schiedenen Witterungslagen
Diss., City Druck, 44 S., Zürich 1968
- 22 MILLER R. G. An application of multiple discriminant analysis to the probabilistic
prediction of meteorological conditions affecting operational de-
cisions
The travelers research center Inc., technical memorandum no. 4
TRC M-4, XXX+138 p., Connecticut 1961
- 23 SCHUEPP M.,
 UTTINGER H. Wolken, Wind und Wetter
Büchergilde Gutenberg, 263 S., Zürich 1950
- 24 SCHWEITZER H. Versuch einer Erklärung des Föhns als Luftströmung mit über-
kritischer Geschwindigkeit
Archiv Met. Geoph. Biokl. A5, S. 350-371, Wien 1953
- 25 SKODA G. Statistische Kriterien für das Erlöschen des Föhns in Westöster-
reich
Wetter und Leben, Jg. 21, Heft 5-6, S. 98-103, Wien 1969
- 26 STREIFF-BECKER R. Neue Untersuchungen über den Föhn in den Schweizer Alpen
Denkschrift der Schw. Nat. Ges., Band 74, Abh. 4, S. 241-278,
Zürich 1942
- 27 UNDT W. Meteorologie des Föhns
Medizin-Meteorologische Hefte, Jg. 1958, Nr. 13, S. 97-111,
Hamburg 1958
- 28 WACHTER H. Empirische Wahrscheinlichkeit auf Grund ein- und zweidimen-
sionaler, klimatologischer Häufigkeitsverteilungen
Zeitschrift für Meteorologie, Band 20, Heft 1-6, S. 186-190,
Berlin 1968
- 29 WALTER E. Der Schweizerföhn
Neujahrsblatt der Naturforschenden Ges. in Zürich auf das Jahr
1938, Gebr. Fretz AG, 40 S., Zürich 1938
- 30 WIDMER R. Föhnerscheinungen im Rheintal
Zusammenfassung erster Untersuchungsergebnisse
Manuskript, unveröffentlicht
- 31 WIDMER R. Statistische Untersuchungen über den Föhn im Reusstal und Ver-
such einer objektiven Föhnprognose für die Station Altdorf
Diss. Vierteljahresschrift NG Zürich 111(3/4), S. 331-375,
Zürich 1966

- 32 YABUKI K.,
SUSUKI S. A study on the airflow over mountains
Bulletin of the University of Osaka Prefecture, series B,
vol. 19, p. 51-193, Osaka 1967
- 33 WEBER E. Grundriss der biologischen Statistik
Gustav Fischer Verlag, 674 S., Stuttgart 1967

Im weiteren wird auf das von UNDT²⁷ zusammengestellte Literaturverzeichnis verwiesen, welches eine umfassende Uebersicht der bis 1957 erschienenen Publikationen zum Thema Föhn liefert.

INHALTSVERZEICHNIS

I. STATISTISCHE VERFAHREN UND AUTOMATISCHE DATENVERARBEITUNG

1. Beurteilung von Häufigkeitsverteilungen	3
2. Regression und Korrelation	3
3. Das Trennverfahren	4
3.1. Berechnung der linearen Trennfunktionen	5
3.1.1. Trennung zweier Gruppen	5
3.1.2. Trennung mehrerer Gruppen	6
3.2. Bestimmung der Zugehörigkeit einer Beobachtung zu einer Gruppe	7
3.3. Prüfung, ob die einzelnen Gruppen aus verschiedenen Grundgesamtheiten stammen	8
3.4. Beurteilung der Bedeutung der einzelnen Variablen für die Trennung der Gruppen	8
4. Elektronische Datenverarbeitung	9

II. BESTIMMUNG DER FÖHNTERMEINE IN BAD RAGAZ MIT HILFE DES TRENN- VERFAHRENS VON FISHER

1. Problemstellung	10
2. Untersuchungsmaterial	10
3. Bestimmung der Trennfunktionen	11
3.1. Auswahl der Testgruppen	11
3.2. Bestimmung der für den Trennvorgang geeigneten Merkmale	11
3.2.1. Wind	13
3.2.2. Temperatur	15
3.2.3. Relative Feuchtigkeit	15
3.2.4. Luftdruck und Bewölkung	17
3.2.5. Auswahl der signifikanten Merkmale	17
4. Modifikation der Variablen im Hinblick auf die Bestimmung einer für das ganze Jahr gültigen Trennformel	20
4.1. Tages- und Jahresgang der drei Föhnkriterien	20
4.2. Reduktion des Tages- und Jahresganges	22
5. Bestimmung der jährlichen Trennformel	25
5.1. Grössen und Zusammensetzung der Testgruppen	25
5.2. Jahrestrennformel	26
6. Gestaffelte Anwendung zweier Trennfunktionen	32
7. Festlegung des Grenzwertes für die Föhnwahrscheinlichkeit der Föhnfälle	33
8. Vergleich der automatisierten Trennung mit der subjektiven Beurteilung	35
8.1. Bestimmung der Föhntermine durch eine Gruppe von Versuchspersonen	35
8.2. Vergleich mit den objektiven Resultaten	37

9. Analyse der Fehlklassifikationen und Bestimmung der Aussagekraft der objektiven Resultate	37
9.1. Ursachen der Fehlklassifikation	37
9.2. Genauigkeit der objektiven Resultate	38
9.3. Miteinbezug grossräumiger Föhnkriterien in die Trennformeln	39
10. Anwendung der entwickelten Trennfunktionen	39
10.1. Beobachtungsreihe Bad Ragaz 1939-1968	39
10.1.1. Beurteilung der verwendeten Transformationsparameter	39
10.1.2. Die Fehlerrate in früheren Jahren	40
10.1.3. Die Föhnhäufigkeiten von 1939-1968	40
10.2. Beobachtungsreihe Altdorf 1901-1968	43
10.2.1. Verwendung der Trennformeln der Station Bad Ragaz	43
10.2.2. Fehlerrate des Trennverfahrens in Altdorf	44
10.2.3. Die Föhnhäufigkeiten von 1901-1968	44
10.3. Vergleich der Föhnverhältnisse in Bad Ragaz und Altdorf	45
10.3.1. Anwendbarkeit der Trennformel und Fehlerraten	45
10.3.2. Die Föhnhäufigkeiten	45
11. Der Einfluss des Föhns auf die Temperaturmittelwerte von Bad Ragaz und Altdorf	46
III. DIE FOEHNVERHAELTNISSE IM RHEINTAL ZWISCHEN CHUR UND ALTSTAETTEN VOM JULI 1967 BIS JUNI 1969	
1. Einführung	48
2. Das Stationsnetz	48
3. Föhnhäufigkeiten im Rheintal während der zweijährigen Untersuchungsperiode (Juli 1967 - Juni 1969)	50
4. Windverhältnisse	54
4.1. Windrichtung	54
4.2. Windstärke	54
5. Temperatur	58
6. Relative Feuchtigkeit	61
7. Luftdruckdifferenz Kloten - Locarno	62
8. Zusammenfassung	63
Literaturverzeichnis	64
Inhaltsverzeichnis	67

LEBENS LAUF

von Thomas G u t e r m a n n, geboren am 14. Juni 1937 in Zürich, Bürger von Arbon TG und Zürich.

Nach dem Besuch der Primar- und Sekundarschule in Zürich absolvierte ich das Kantonale Unterseminar in Küsnacht und schloss nach dem Jahreskurs des Oberseminars in Zürich im Frühling 1958 die Primarlehrerausbildung ab. Nach dreijähriger praktischer Tätigkeit als Verweser an der Primarschule Thalheim an der Thur und anschliessend verschiedenen Vikariaten immatrikulierte ich mich im Wintersemester 1961/62 an der Universität Zürich, wo ich nach vier Semestern im Herbst 1963 das Sekundarlehrerpatent des Kantons Zürich erwarb. Es folgten erneut zwei Verwesereien: bis im Frühjahr 1964 an der Real-, dann während eines Jahres an der Sekundarschule der Stadt Zürich. Neben dem Schuldienst besuchte ich weiterhin einige Vorlesungen und entschloss mich im Frühling 1965, das Geographiestudium physikalisch-meteorologischer Richtung in Angriff zu nehmen. Während der folgenden Studien (vorwiegend physikalische und meteorologische Fächer) war ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter vom Herbst 1965 bis Herbst 1966 am Geographischen Institut der Universität bei Herrn Prof. D. Steiner und ab 1967 bis Sommer 1969 an der Meteorologischen Zentralanstalt in Zürich tätig. Ab Oktober 1969 wurde mir wiederum am Geographischen Institut eine Assistenz im Umfang einer Halbtagesstelle übertragen.

Vorlesungen und Uebungen besuchte ich bei den folgenden Professoren und Dozenten:

Geographie, Geologie und Völkerkunde	: Boesch, Suter, Guyan, Steiner, Andresen
Klimatologie, Meteorologie	: Schüepp, Gensler, Dütsch (ETH), de Quervain (ETH), Kuhn (ETH)
Physik	: Verena Meyer, Heitler, Ackeret (ETH)
Zoologie	: Hadorn, Burla, Chen, Hediger
Botanik	: Wanner, Markgraf, Rohweder
Mathematik	: v.d. Waerden, Züllig, Ginsburg (ETH)
Chemie	: Viscontini, Schumacher, Eugster
Pädagogik, Psychologie und Didaktik	: Weber, Aebli, Widmer, Marthaler, Angst, Suter, Bohren

Die vorliegende Dissertation entstand unter der Leitung der Herren Prof. Dr. H. Boesch und Prof. Dr. M. Schüepp.

